



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV PROCESNÍHO A EKOLOGICKÉHO
INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PROCESS AND ENVIRONMENTAL ENGINEERING

MODELOVÁNÍ JAKO ÚČINNÝ NÁSTROJ V PRŮMYSLOVÉ PRAXI A EKONOMICKÉ ASPEKTY

MODELLING AS EFFICIENT TOOL IN INDUSTRIAL PRACTICE AND ECONOMIC ASPECTS

DOKTORSKÁ PRÁCE
DOCTORAL THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

ING. MAREK ŠARLEJ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

PROF. ING. PETR STEHLÍK, CSC.

BRNO 2012

ABSTRAKT

Tato dizertační práce se zabývá problematikou modelování jako účinného nástroje použitelného v průmyslové praxi v oblasti ekologie a energetiky. Je zde představeno jak modelování části technické, tak i ekonomické a zároveň jejich propojení.

Podniky v případě potřeby nehodnotí pouze technické řešení s ohledem na investiční náklady, ale hledají optimalizované řešení po stránce technické i ekonomické.

Dizertační práce se zaměřuje jak na modelování jednotlivých zařízení, tak i technologických jednotek a to v různých úrovních komplexnosti.

Jsou zde uvedeny konkrétní případové studie využívající různé úrovně modelování.

KLÍČOVÁ SLOVA

modelování, CFD, odpady, biomasa, finanční model, peněžní tok

ABSTRACT

This doctoral thesis focuses on modelling as an efficient tool in industrial practice in the field of power industry and environmental engineering. It represents the modelling for technical as well as for economic part and their combination.

Industrial companies do not evaluate only technical solutions in terms of investment costs, however, they search for optimized technical-economic solutions.

The doctoral thesis describes the modelling of individual equipment as well as technological units in various levels of complexity.

Case studies utilising various levels of modelling are represented herein.

KEY WORDS

modeling, CFD, waste, biomass, financial model, cash-flow

Bibliografická citace práce

Šarlej, M. *Modelování jako účinný nástroj v průmyslové praxi a ekonomické aspekty*. Brno, 2012. 65 s. Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce prof. Ing. Petr Stehlík, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem disertační práci vypracoval samostatně a že všechny použité literární zdroje jsem správně a úplně citoval.

V Brně dne 15. srpna 2012

Poděkování

Děkuji prof. Ing. Petru Stehlíkovi, CSc. za odborné vedení, cenné rady a předávání zkušeností během mého doktorského studia, za poskytnutí kvalitního studijní zázemí a pomoci během celého mého studia na Vysokém učení technickém v Brně.

Také bych rád poděkoval svým blízkým a rodině za jejich podporu a pomoc po dobu mého studia.

V neposlední řadě patří dík řediteli Ing. Jaroslavu Oralovi a mým kolegům ze společnosti EVECO Brno za poskytování cenných informací a zkušeností, bez kterých by dokončení této disertační práce nebylo možné.

OBSAH

1	Úvod.....	9
2	Technologická jednotka a zařízení.....	9
2.1	Technologická jednotka.....	9
2.2	Technologické zařízení.....	11
3	Modelování a jeho význam.....	12
4	Úrovně využití modelování.....	14
4.1	Poptávka a nabídka.....	14
4.2	Simulační výpočty technologických jednotek.....	15
4.2.1	Specifikace zadání.....	15
4.2.2	Vlastní simulační výpočet.....	16
4.3	Výpočty zařízení.....	17
4.4	Využití výpočtové dynamiky tekutin – CFD.....	18
4.4.1	Návrh nových zařízení.....	19
4.4.2	Troubleshooting.....	19
4.4.3	Optimalizace.....	19
5	Modelování s využitím CFD.....	21
5.1	Současný stav.....	21
5.2	Konvenční a typová zařízení.....	21
5.3	Atypická zařízení a prototypy.....	21
5.4	Ekonomické aspekty využití CFD.....	24
5.4.1	Přidaná hodnota.....	24
5.4.2	CFD jako nástroj obchodní a marketingové strategie.....	24
5.5	Význam CFD v mezinárodních výzkumných projektech.....	26
6	Případové studie.....	26
6.1	Využití modelování na bázi CFD u nízkoemisních hořáků.....	26
6.1.1	Úvod.....	26
6.1.2	Konstrukce zkušebního hořáku.....	27
6.1.3	Výpočetní model.....	28
6.1.4	Analýza výsledků.....	31
6.1.5	Závěr.....	33
6.2	Ověření modelování CFD.....	34
6.2.1	Úvod.....	34

6.2.2	Experimentální zařízení.....	34
6.2.3	Měření extrakce tepla	37
6.2.4	Výpočet extrakce tepla	38
6.2.5	Ověření spolehlivosti CFD predikcí.....	39
6.2.6	Závěr.....	41
6.3	Výměník termoolej/spaliny	41
6.3.1	Úvod.....	41
6.3.2	Popis problému.....	42
6.3.3	Navrhovaná řešení.....	43
6.3.4	Ekonomická rozvaha	43
6.3.5	Závěr.....	47
6.4	Zařízení pro energetické využití odpadů malých kapacit	47
6.4.1	Úvod.....	47
6.4.2	Základní vstupní údaje	47
6.4.3	Investice a reinvestice	48
6.4.4	Náklady	49
6.4.5	Tržby	49
6.4.6	Výkaz zisku a ztrát	50
6.4.7	Peněžní toky	50
6.4.8	Vyhodnocení projektu	50
6.4.9	Závěr.....	52
6.5	Technologická jednotka pro energetické využití dřevního odpadu.....	52
6.5.1	Úvod.....	52
6.5.2	Základní vstupní údaje	53
6.5.3	Investice a reinvestice	54
6.5.4	Náklady	55
6.5.5	Tržby	55
6.5.6	Výkaz zisku a ztrát	55
6.5.7	Peněžní toky	56
6.5.8	Vyhodnocení projektu	56
6.5.9	Závěr.....	58
7	Závěr	58
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	59

SEZNAM PŘÍLOH	61
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ	62
SEZNAM OBRÁZKŮ	63
SEZNAM TABULEK.....	64

1 ÚVOD

Tato dizertační práce se zabývá problematikou modelování jako účinného nástroje použitelného v průmyslové praxi v oblasti ekologie a energetiky. Je zde představeno jak modelování týkající se technického řešení, tak i ekonomického zhodnocení.

Podniky v případě potřeby nehodnotí pouze technické řešení s ohledem na investiční náklady, ale hledají optimalizované řešení po stránce technické i ekonomické.

Dizertační práce se zaměřuje jak na modelování jednotlivých zařízení, tak i technologických jednotek a to v různých úrovních komplexnosti.

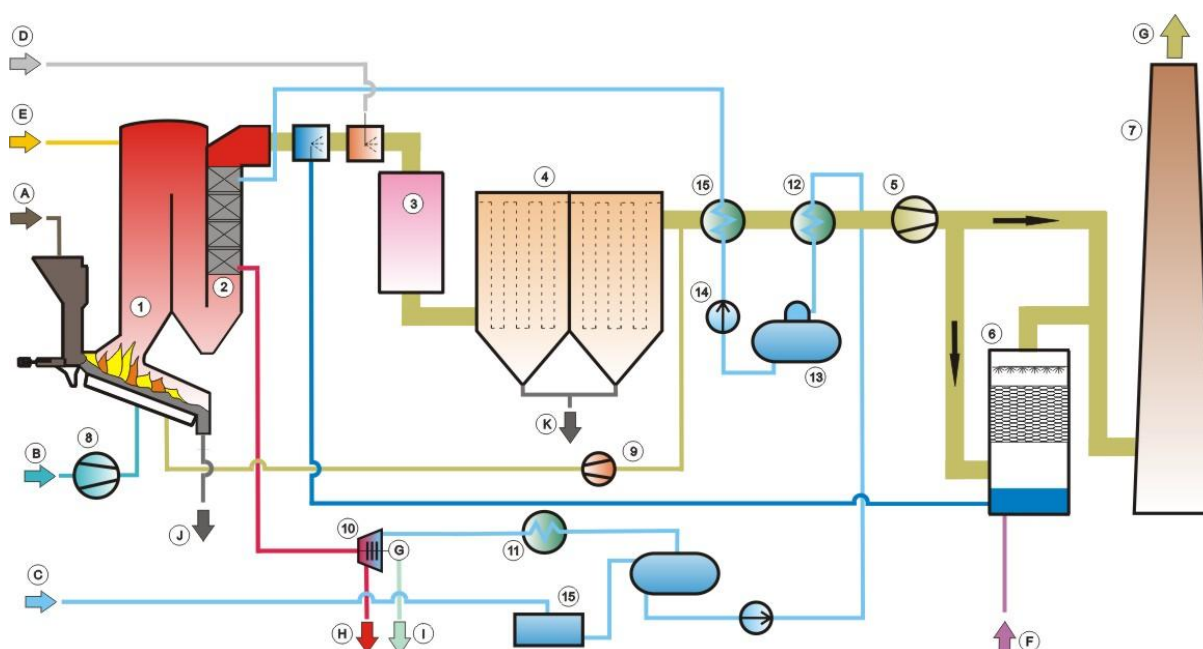
Jsou zde uvedeny případové studie s využitím modelování a to jak v oblasti technické tak i ekonomické.

2 TECHNOLOGICKÁ JEDNOTKA A ZAŘÍZENÍ

2.1 Technologická jednotka

Technologická jednotka je funkčním celkem, který se skládá z jednotlivých, vhodně sestavených zařízení (aparátů). V oblasti ekologie a energetiky může pro ilustraci posloužit příklad technologické jednotky pro energetické využití odpadů [17].

Taková technologická jednotka zahrnuje zařízení pro skladování a dopravu odpadu, spalovací komoru s roštem, sekundární spalovací komoru, teplovodní/horkovodní/parní kotel, zařízení pro vynášení a skladování popela, zařízení pro čištění spalin a komín. V případě konfigurace s výrobou páry může být jednotka doplněna o turbogenerátor s příslušenstvím za účelem produkce elektrické energie [19].



Obr. 1 - Schéma technologie pro energetické využití odpadů (zdroj [4])

ZAŘÍZENÍ:

1. spalovací zařízení - rošt
2. parní kotel
3. reaktor suché sorpce
4. 4D filtr
5. spalínový ventilátor
6. mokrá pračka
7. komín
8. ventilátor spalovacího vzduchu
9. ventilátor recirkulace spalín
10. parní turbína s generátorem
11. kondenzátor
12. předehřev napájecí vody
13. napájecí nádrž s odplynovákem
14. napájecí čerpadlo
15. ekonomizér
16. chem. úpravna vody s nádrží vody

VSTUPY:

- A. odpad
- B. spalovací vzduch
- C. surová voda
- D. soda
- E. močovina
- F. hydroxid sodný

VÝSTUPY:

- G. Vyčištěné spaliny
- H. pára
- I. elektrická energie
- J. škvára a hrubý popílek
- K. popílek

Skladba zařízení pro čištění spalín je závislá na mnoha faktorech, především na druhu spalovaného odpadu, platných emisních limitech, lokálních podmínkách, dostupnosti surovin, atd [18]. U zvoleného příkladu jsou primárním faktorem platné emisní limity stanovené legislativou Evropské Unie. V případě technologické jednotky pro energetické využití biomasy je v rámci systému čištění zařazen pouze multicyklón, který odlučuje s dostatečnou rezervou tuhé znečišťující látky ze spalín. V případě energetického využití odpadů je systém čištění spalín mnohem komplexnější. Je navržen jako kompletně suchý proces. Sestává ze zařízení pro dávkování aditiv a z tzv. 4D filtru [20], který integruje čtyři jednotkové do jednoho aparátu (více v [4]). Popílek je v obou případech skladován v uzavřených kontejnerech. Vyčištěné spaliny odcházejí přes spalinový ventilátor komínem do atmosféry.

U modelování se po technické stránce jedná nejčastěji o technologickou bilanci tj. materiálovou a energetickou bilanci jednotky jako celku na základě zadávacích údajů. Tyto údaje však bývají v praxi často neúplné a některé parametry je třeba odhadnout. Dle výsledků technologické bilance se stanoví základní parametry jednotlivých zařízení. U nové technologické jednotky je technologická bilance založena na požadovaném hlavním vstupním proudu, tzn. zpracovatelské kapacitě technologické jednotky tj. množství odpadů nebo biomasy anebo naopak, na požadovaných výstupních proudech, nejčastěji množství vyrobené páry, elektrické anebo tepelné energie. U technologických jednotek nebývají modelovány detaily jednotlivých zařízení (aparátů).

V první fázi, nejčastěji pro přípravu nabídky popř. basic designu, bývá pro modelování nejčastěji využíváno tabulkových procesorů (např. Microsoft Excel). V dalších fázích, např. úroveň detail design, se používají speciální komerční nebo „in-house“ bilanční software pro detailnější modelování. Nejsou ovšem výjimkou případy, kdy se i v rámci této fáze používá tabulkových procesorů.

Výstupem modelování technologické jednotky bývají podklady pro návrh technologických schémat včetně technologických údajů o jednotlivých proudech a základní parametry technologických zařízení.

2.2 Technologické zařízení

Technologické zařízení tvoří součást technologické jednotky, nicméně z pohledu modelování je na něj nahlíženo jako na solitér ohraničený vstupními a výstupními proudy. Úroveň modelování záleží na aktuální potřebě. Může se jednat o základní výpočet rozměrů zařízení,

tepelných a tlakových ztrát, tepelné roztažnosti. Jako výpočtové nástroje se používají tabulkové procesory nebo simulační výpočtové systémy. Může se ale jednat i o pokročilé modelování proudění, optimalizace tvaru zařízení, chemicko-fyzikálních procesů anebo o pevnostní výpočty, obojí s využitím komplexních softwarových systémů na bázi metody konečných prvků [1].

Příkladem technologického zařízení použitého v rámci výše uvedené technologické jednotky na energetické využití odpadů je sekundární spalovací komora. Jedná se o zařízení umístěné za spalovací komorou. Hlavní funkcí sekundární spalovací komory je zajištění kompletního vyhoření spalitelných složek spalin (především CO). Komora bývá navržena tak, aby splňovala určitou zdržnou dobu a minimální teplotu spalin. Tyto podmínky jsou stanoveny legislativně [2]. Nejčastěji mívá komora válcový tvar. Může být konstruována buď s horizontální, nebo vertikální osou. Sekundární spalovací komora bývá osazena hořákem popř. více hořáky, které zajišťují plnění výše uvedeného legislativního požadavku minimální teploty spalin. Tento souhrn parametrů a požadavků musí být zohledněn při modelování. Návrh komory může vycházet z praxí ověřených empirických vztahů a modelování provedeno pomocí základních vztahů s využitím kalkulačky nebo tabulkového procesoru. Je možné ovšem využít i sofistikovaný software na bázi konečných prvků a modelovat proudění spalin za účelem optimálního návrhu tvaru komory a umístění hořáků. Tato problematika je podrobněji zpracována v [3].

3 MODELOVÁNÍ A JEHO VÝZNAM

Cílem modelování technologických jednotek a jednotlivých zařízení je napodobit jejich reálný provoz jak po stránce technické, tak i po stránce ekonomické.

U modelování technologických jednotek a zařízení v oblasti ekologie a energetiky se můžeme setkat s různými úrovněmi způsobu modelování. Projdeme-li si přípravu průmyslového realizačního projektu, setkáme se s různými druhy modelování a různými úrovněmi.

Na základě poptávky zákazníka bývá nejprve zpracováno technologické schéma, ze kterého je patrné navrhované technické řešení. Dle technologického schématu bývá poté vypracována materiálová a energetická bilance, ze které vyplývají základní parametry jednotlivých proudů a zařízení v rámci technologie. Zde bývají nasazovány základní fyzikálně-chemické bilanční vztahy.

Dle komplexnosti úlohy je pro tyto účely možné plně využít možností tabulkového procesoru Microsoft Excel, který bývá v průmyslové praxi hojně využíván, popř. sáhnout po simulačním software vyvinutém pro danou aplikaci. Takový software může být komerční (např. GPROMS, ChemCAD, apod.) popř. tzv. in-house, tedy software vyvinutý a provozovaný uvnitř společnosti.

Příkladem in-house výpočtového software je např. systém W2E, který byl vyvinut na VUT v Brně, Fakultě strojního inženýrství, Ústavu procesního a ekologického inženýrství v rámci projektu WARMES „Odpady jako suroviny a zdroje energie (Waste as raw material and energy source“. Jedná se o komplexní nástroj a metodiku pro koncepční návrh, výpočet výrobních ukazatelů a hodnocení zařízení pro energetické využití odpadů. Vývoj systému označeného W2E a jeho aplikací je výsledkem mezioborové součinnosti a na základě analýz založených na aplikaci vyvinutého výpočtového systému je možné specifikovat obecně platná doporučení vedoucí k maximálnímu využití energie ve spalovnách odpadů. Software umožňuje dynamické propojení simulačního modelu spalovny tuhých komunálních odpadů na bázi hmotnostních a energetických bilancí s uživatelskými formuláři, ve kterých probíhá vyčíslení energetických toků a následně kritérií pro hodnocení stupně využití energie. Software umožňuje výpočet v souladu s legislativou Evropské Unie (směrnice 98/2008/ES, kritérium R1).

Na základě výsledků technologické bilance vyplývají základní parametry zařízení, ze kterých se technologie skládá. Zařízení jsou v rámci technologického schématu ovšem pouze tzv. „black box“ zařízení. Proto je nutné zpřesnit základní parametry a získat podrobnější údaje pomocí dalších výpočtů. Za tímto účelem se provádějí detailní výpočty. Výsledkem bývají detailní technické a technologické parametry.

Příkladem z oblasti modelování zařízení, konkrétně výměníků tepla, je modularizovaná databáze HGA (Hot Gas Application), která umožňuje výběr vhodného typu výměníku tepla na základě hlavních parametrů řešené aplikace, tepelně-hydraulický návrh výměníku vybraného typu a v případě výběru několika technicky rovnocenných typů ekonomické porovnání mezi nimi a výběr nejvhodnějšího typu. Rutinní nasazení databáze HGA je úspěšně využíváno v praxi, což dokládá řada úspěšných komerčních projektů. Z porovnání dosažených výsledků v České republice a v zahraničí lze konstatovat, že dosažené výsledky v řešených oblastech jsou nové a originální a zcela srovnatelné s evropskou a světovou úrovní.

Dále je možné využít simulačních výpočtů proudění anebo pevnostních na základě metody konečných prvků. Zde se jedná o detailní výpočty, které bývají zpravidla časově velmi

náročné a mají celkově zvýšené nároky na hardware. Proto je nasazení takových simulačních výpočtů vždy nutno důkladně zvážit.

Dalším příkladem jsou optimalizační výpočty, které jsou aplikovatelné jak ve fázi návrhu nových technologických jednotek a zařízení, tak i pro ty stávající s cílem optimalizace provozu.

4 ÚROVNĚ VYUŽITÍ MODELOVÁNÍ

4.1 POPTÁVKA A NABÍDKA

V průmyslové praxi je úroveň zpracování nabídky a modelování přizpůsobena individuálně. Proto je téměř nemožné definovat nějaká obecná pravidla. Nabídka se především přizpůsobuje zákazníkovi; závažnosti obchodního případu, která bývá patrná z úrovně poptávky; požadovanému rozsahu předmětu nabídky; množství času na přípravu nabídky; atd.

Vzhledem k tomu, že čas na přípravu nabídky bývá velice často značně omezený, nezbyvá na pokročilejší úroveň modelování čas, a proto bývají technologické výpočty nejčastěji provedeny pouze zjednodušeně pomocí základních výpočtových vztahů prostřednictvím kalkulačky anebo tabulkového procesoru.

Jako příklad může sloužit bilanční výpočet výše uvedené technologické jednotky pro energetické využití odpadů, na jehož základě je vypracována technická i obchodní část nabídky. V praxi se často ukazuje, že je tato úroveň výpočtu plně dostačující jak pro nabídkové řízení, tak i pro realizaci projektů, především v roli generálního dodavatele. Z bilančního výpočtu vyplývají základní údaje, které jsou potřebné pro návrh jednotlivých technologických zařízení. Poté je možné sestavit i nabídkovou cenu a stanovit garantované technologické parametry (pokud jsou požadovány). Dle úrovně výpočtu, složitosti technologie, dodavatelských rizik, garantovaných parametrů, výše smluvních pokut, požadavků na montáž, uvádění technologie do provozu a provozních rizik je do nabídkové ceny zahrnuta odpovídající rezerva. Vzhledem k tomu, že se výše uvedená rizika vztahují k základní úrovni využití modelování, bývá počítáno s větší cenovou rezervou, která následně přispívá ke zvýšení nabídkové ceny. Tento efekt má negativní vliv na konkurenceschopnost nabídky a proto je potřeba vždy úroveň využití modelování důkladně zvážit.

Ovšem v některých případech je již ve fázi nabídky využito vyšší úrovně modelování a to jak v části technické tak i obchodní. Jedná se především o případy, kdy je zjevný vážný zájem zákazníka o nabízené řešení a je třeba ho přesvědčit o výhodnosti nabízeného řešení po všech stránkách.

Pokud to charakter předmětu nabídky dovoluje, může v této fázi tvořit přidanou hodnotu prezentace výsledků simulačních výpočtů na bázi CFD (Computational Fluid Dynamics).

Co se týká modelování v rámci obchodní části nabídky, je v případě požadavku zákazníka anebo pro znázornění výhodnosti nabízeného technického řešení doporučeno uvést kromě nabídkové ceny i vyčíslení provozních nákladů (vypočtených na základě výše uvedené technologické bilance), popř. uvést ekonomické zhodnocení na delší časové období provozu technologie.

Ekonomické zhodnocení je obzvlášť vhodné zpracovat pro případy high-tech technologií, které bývají často spojeny s vyššími pořizovacími náklady, nicméně přednosti těchto technologií se prokáží teprve při dlouhodobém provozování a to díky nižším provozním nákladům, vyšší spolehlivosti a delší životnosti.

4.2 SIMULAČNÍ VÝPOČTY TECHNOLOGICKÝCH JEDNOTEK

4.2.1 Specifikace zadání

V praxi se často setkáváme se skutečností, že zadání není specifikováno dostatečně, často jsou některé vstupní údaje nejasné popř. chybí úplně. Nezbyvá pak než chybějící údaje odborně odhadnout a míru rizika s tím spojenou poté zohlednit v ceně. Simulační výpočty zde pak hrají klíčovou roli, neboť je pomocí nich možné tato rizika snížit.

Jako příklad poslouží zadání pro návrh technologické jednotky pro energetické využití biomasy (dřevního odpadu). Zadání bylo zákazníkem specifikováno následovně: zákazník má určité množství dřevního odpadu, neboť se jeho podnik zabývá zpracováním dřeva, pro zpracování dřeva potřebuje technologickou páru, dále pak teplo ve formě teplé vody pro sušárny dřeva a samozřejmě potřebuje elektrickou energii. Do budoucna počítá s rozšířením výroby a tím pádem bude potřebovat víc sušáren dřeva, technologickou jednotku je tedy třeba navrhnout s dostatečnou rezervou. Takové zadání obsahuje značné množství neznámých. Technické řešení je třeba navrhnout tak, aby uspokojovalo všechny tyto požadavky, a přitom musí být zároveň ekonomicky atraktivní.

4.2.2 Vlastní simulační výpočet

Jednoduché výpočty

Na základě zadání bývá často proveden zjednodušený výpočet založený na základě využití základních fyzikálně-chemických vztahů. Tento výpočet dává základní obrysy návrhu technického řešení. Pro účely tohoto výpočtu stačí kalkulačka popř. tabulkový procesor. Z tohoto výpočtu vyplývají orientační údaje o vstupních a výstupních proudcích, rozsahu technologické jednotky a tím i o předpokládané výši investice. Výsledky výpočtu bývají použity pro další zpřesňující jednání se zákazníkem, v případě jeho zájmu pro vypracování orientační nabídky na dodávku technologické jednotky. Navíc díky jejich jednoduchosti a transparentnosti také pro zpětnou kontrolu detailních výpočtů kompletní technologické jednotky a jednotlivých zařízení, zda jsou výsledky zjednodušených a detailních výpočtů řádově v souladu.

Stejný postup byl proveden i u výše zmíněného příkladu technologické jednotky pro energetické využití biomasy (dřevního odpadu). Na základě zjednodušeného výpočtu, ze kterého vyplynuly základní parametry jako celkový tepelný výkon, svorkový elektrický výkon a množství spalovaného dřevního odpadu, byla pro zákazníka vypracována orientační nabídka zahrnující i orientační cenu. Na základě předložené orientační nabídky probíhala další jednání za účelem detailnější specifikace zadání. Jednoduché výpočty byly pro tento případ provedeny v tabulkovém procesoru Microsoft Excel.

Za zmínku ještě stojí, že zjednodušené výpočty, díky jejich časové nenáročnosti, dovolují simulační výpočet několika alternativ a jejich následné porovnání, což je obzvlášť výhodné v počáteční fázi rozhodování.

Detailní výpočty

Pro účely vypracování konkrétní nabídky, projektové dokumentace a někdy i studie proveditelnosti již bývají využívány detailnější simulační výpočty technologických jednotek. Pomocí těchto simulačních výpočtů jsou získány podrobnější údaje o vstupních a výstupních proudcích, které jsou potřebné pro detailní návrh technologie a jednotlivých zařízení.

Ve zvoleném konkrétním příkladě technologické jednotky na energetické využití odpadů se jedná o vypracování technologické bilance, která se skládá z materiálové a energetické části.

V této fázi byly od zákazníka získány a analyzovány vzorky dřevního odpadu, který bude v technologické jednotce spalován a výsledky laboratorní analýzy byly použity jako vstupní údaje pro výpočet bilancí. Oproti výše uvedenému zjednodušenému výpočtu získáváme podrobnější údaje o vstupních a výstupních prouděch, konkrétně množství, složení, teplotě a tlaku spalin, primárního a sekundárního spalovacího vzduchu, množství popela a popílku, spotřebě elektrické energie jednotlivých zařízení i celé technologické jednotky. Výsledky technologické bilance jsou vstupním podkladem pro výpočty jednotlivých zařízení (návrh konstrukčních a technologických parametrů).

Detailní simulační výpočty technologické jednotky lze provádět pomocí tabulkových procesorů (v praxi hojně rozšířený Microsoft Excel) nebo pomocí komerčních (např. ChemCAD, gPROMS) nebo vlastních „in-house“ software (např. W2E).

Detailní simulační výpočty lze použít i pro ekonomické zhodnocení technického řešení. Zde vstupují do simulačních výpočtů kromě investičních nákladů (tedy nabídkové ceny v případě dodávky formou na klíč) i náklady na reinvestice, provozní náklady, osobní náklady, a případné tržby. Podkladem pro ekonomické zhodnocení jsou výsledky detailních simulačních výpočtů technického řešení. Ekonomické zhodnocení se provádí na delší časové období, nejčastěji na dobu předpokládané životnosti technologické jednotky popř. zařízení. Výsledkem ekonomického zhodnocení bývá zpravidla výpočet vnitřního výnosového procenta, čisté současné hodnoty a prosté časové návratnosti. Na základě těchto výsledků se zákazník často rozhoduje, zda je ekonomicky výhodné navržené řešení realizovat, popřípadě si může vybrat ekonomicky nejatraktivnější řešení v případě simulačních výpočtů více alternativ technického řešení.

Pro účely zpracování ekonomického zhodnocení se nejčastěji využívají tabulkové procesory, bohatě vystačí Microsoft Excel.

4.3 VÝPOČTY ZAŘÍZENÍ

Výpočty zařízení jsou založeny na výsledcích simulačních výpočtů technologické jednotky, jejíž jsou součástí. Podobně jako v předchozí kapitole je možné výpočty rozdělit na jednoduché a detailní. Cílem obou úrovní těchto výpočtů je návrh konkrétních konstrukčních a technologických parametrů zařízení.

Zjednodušené výpočty se v praxi často používají jako podklad pro vypracování nabídky od subdodavatelů jednotlivých zařízení. Subdodavatelé na základě těchto vstupních dat mohou

díky své odbornosti nabídnout konkrétní zařízení, které splňuje technologické požadavky. Tím pro generálního dodavatele odpadá nutnost provádět detailní výpočty, což šetří čas a tím i náklady na práci projektanta. Subdodavatelé buď vyberou svoje vhodné typové zařízení anebo na základě vstupních údajů provedou detailní výpočty a navrhnou zařízení „na míru“ s tím, že tyto projekční činnosti zohlední ve své nabídkové ceně.

V případě technologické jednotky pro energetické využití dřevního odpadu bylo využito výše uvedeného scénáře. Na základě zjednodušených výpočtů byla poptána jednotlivá zařízení. Výsledky zjednodušených výpočtů byly zároveň použity pro kontrolu nabídek subdodavatelů, zda nabízené technické řešení odpovídá vypočteným technologickým požadavkům.

V některých případech je ovšem žádoucí provést detailní výpočty zařízení. Jedná se především o případy návrhu atypických zařízení. Dále pak v případech zařízení, kdy je do jejich návrhu promítnuto firemní know-how, jenž má společnost zájem chránit před konkurencí a tím zvyšovat svoji konkurenceschopnost.

Příkladem může být návrh tepelného výměníku pro předehřev primárního a sekundárního spalovacího vzduchu pro technologickou jednotku pro energetické využití biomasy. Tento druh tepelného výměníku je zcela typický pro jednotky velkých výkonů, ovšem není rozšířen u jednotek středních výkonů, kam byl tento prvek pro svoje vlastnosti přenesen. Proto bylo nutné provést detailní výpočet za účelem návrhu technologických a konstrukčních parametrů [5].

4.4 VYUŽITÍ VÝPOČTOVÉ DYNAMIKY TEKUTIN – CFD

Modelování na bázi CFD se dá považovat za účinný nástroj sloužící jak pro lepší pochopení základních jevů, tak i pro návrh nebo kontrolu zařízení zahrnující komplexní geometrii. V případě zařízení pro ekologii a energetiku se CFD často používá pro získání představ o proudění (rychlostní profily), o podmínkách výměny tepla (teplotní pole), velikosti tlakových ztrát, ale i pro složitější úkoly jako např. simulace spalování včetně analýzy vybraných emisí ve vznikajících spalínách (např. NO_x). Výsledky mohou poskytnout důležité informace jak pro návrh nových zařízení, tak i pro řešení stávajících problémů. Výsledky mohou sloužit jako dobrý odrazový můstek pro následnou optimalizaci sledovaného zařízení. V případě predikcí složitějších fyzikálně-chemických jevů, jako např. spalování je ovšem nutné brát výsledky simulací s rezervou, protože v této oblasti ještě nejsou výpočtové metody příliš spolehlivé. Z toho důvodu je nezbytné znát jejich výhody a nevýhody **Chyba! Nenalezen zdroj odkazů..**

Kromě toho, přesnost predikcí by měla být ověřena experimenty. Klíčovou roli při rozhodování o nasazení CFD v inženýrské praxi hrají ekonomické aspekty a časové požadavky.

Proč využívat modelování na bázi CFD? Na tuto otázku se pokusíme dát odpověď z následujících tří pohledů:

- z pohledu návrhu nového zařízení,
- z pohledu řešení problémů stávajících procesních zařízení,
- z pohledu optimalizace.

4.4.1 Návrh nových zařízení

V případě návrhu nových zařízení umožňuje CFD návrháři, konstruktérovi pochopit a předem částečně prozkoumat „chování“ nově navrhovaného zařízení. Pomocí tzv. virtuálního prototypu může již v ranné fázi návrhu odhalit slabiny (např. při návrhu tepelných výměníků odhalit „mrtvé zóny“). Prostřednictvím různých modelových alternativ virtuálního prototypu jednoho zařízení lze také na základě porovnání výsledků výpočtu vybrat nejvhodnější alternativu. Jako příklad tohoto přístupu bude dále uveden návrh plynového hořáku s potlačenou tvorbou NO_x.

4.4.2 Troubleshooting

V případě řešení problémů stávajících průmyslových zařízení se nabízí využití CFD především v těch případech, kdy do daného zařízení není umožněn přístup a možnost identifikace problému za provozu. V každém případě je ovšem nutné zvážit rozsah a závažnost problému a podle toho se poté rozhodnout buď pro „rychlý“ odborný odhad zkušeného technika anebo pro časově náročnější modelování. Jako příklady využití CFD bude uvedeno řešení problému se zanášením rekuperačního výměníku „termo-olej/spaliny“.

4.4.3 Optimalizace

Třetí oblastí je optimalizace zařízení. Optimalizace se týká jak návrhu nového zařízení, tak i stávajících zařízení provozovaných v průmyslové praxi. Cíle optimalizace jsou závislé na charakteru sledovaného zařízení (např. minimalizace tvorby NO_x u průmyslových hořáků, zvýšení tepelné účinnosti tepelných výměníků). Navíc pro provozovatele technologických

jednotek a zařízení by měla optimalizace zajistit ekonomické výhody z pohledu investičních a provozních nákladů.

Jak již bylo uvedeno výše, Achilovou patou modelování na bázi CFD je spolehlivost dosažených výsledků. Tento problém se především dotýká složitějších fyzikálně-chemických jevů, mezi které patří i proces spalování. Pro tyto případy se nabízejí následující řešení.

Prvním možným řešením je „vyzkoušení“ nastavených výpočetních modelů na analogické, nicméně značně zjednodušené úloze, pro kterou jsou buď výsledky výpočtu zaznamenány v důvěryhodné odborné studii a lze je tedy porovnat anebo na základě vlastních odborných zkušeností, které je možné aplikovat pro analýzu výsledků jednoduché analogické úlohy. Bude to fungovat i pro složitou úlohu? Existují zdokumentované výsledky, které je možné využít pro ověření výpočtu? Toto jsou značná omezení, spočívající především právě v přenosu „scale-up“ výsledků jednoduché úlohy na složitou.

Druhým možným řešením je ověření výsledků simulačních výpočtů na experimentálním zařízení. Tento přístup je v našem případě využít pro modelování nízkoemisních hořáků s potlačenou tvorbou NO_x. Výsledky simulací jsou ověřovány podle experimentálních dat získaných při měření na zkušebně hořáků. Konfigurace hořáku a spalovací komory odpovídá výpočetnímu modelu. Z toho je patrné, že hlavním omezením tohoto postupu je nutnost mít odpovídající experimentální zařízení, což jde samozřejmě ruku v ruce s růstem investičních a provozních nákladů. Na druhou stranu získáváme kvalitní validační nástroj.

Třetí řešení představuje přímá zpětná vazba z provozu. Navržené výpočtové řešení je přeneseno do praxe s vědomím, že jsou výsledky simulace spolehlivé a reálné. To se ukáže teprve během provozu. Tento přístup představuje značné riziko, které je možné eliminovat zapojením zkušeného technika, který je na základě svých zkušeností z praxe schopný kriticky zhodnotit výpočtové řešení.

Z výše uvedeného vyplývá, že účinné využití modelování na bázi CFD je možné skloubením simulačních výpočtů a praktických zkušeností odborníků z reálných průmyslových provozů, přičemž se nikdy nesmí zapomenout na určující ekonomické aspekty.

5 MODELOVÁNÍ S VYUŽITÍM CFD

5.1 SOUČASNÝ STAV

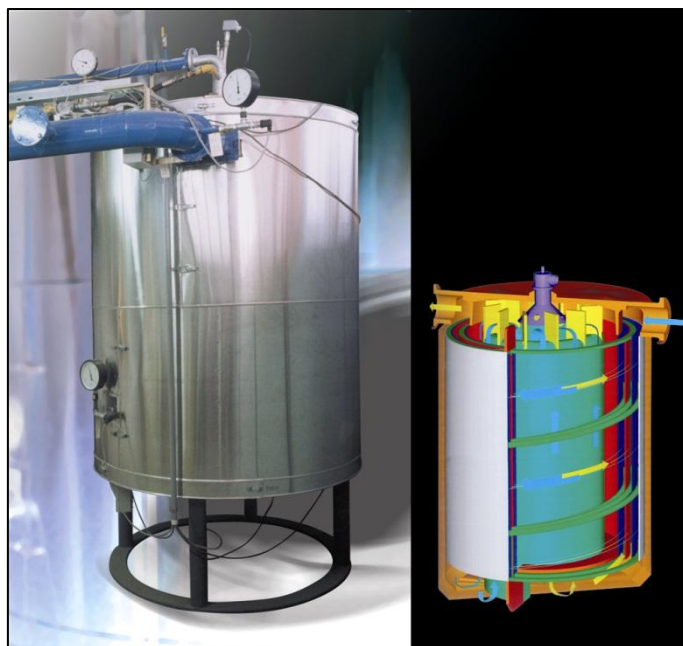
Následující kapitola se věnuje otázkám účinného nasazení CFD. Je efektivnější nasazovat CFD v případě konvenčních a typových zařízení anebo spíše v případě atypických zařízení a prototypů? Na tyto otázky se pokusíme odpovědět v této kapitole.

5.2 Konvenční a typová zařízení

Nejprve se zaměříme na oblast konvenčních a typových zařízení. Příkladem může být jednotka pro energetické využití odpadů, která byla představena v kap 2.1. V případě realizace projektu na výstavbu, popř. rekonstrukci takové jednotky se dodavatelská činnost často řeší formou subdodávek typových zařízení. Toto představuje osvědčený způsob jak se vyhnout riziku spojenému s nasazením nových atypických zařízení, která se nakonec mohou ukázat jako zcela nevyhovující anebo neúčinná. V případě použití typových zařízení přebírá z větší části tato rizika subdodavatel, který zase na druhou stranu svoje zařízení dobře zná a může garantovat jejich použitelnost a účinnost pro daný účel. Z ekonomického hlediska se tento přístup jeví také příznivěji, neboť zde odpadají náklady spojené s návrhem, ověřováním a rizikem nasazení nového atypického zařízení. Optimální konfigurace se v tomto případě dosáhne správnou volbou a vhodným zařazením jednotlivých komponent celého systému. Využití modelování na bázi CFD se z výše uvedených důvodů stává neefektivním.

5.3 Atypická zařízení a prototypy

Na druhou stranu se ovšem využití modelování na bázi CFD přímo nabízí pro návrh atypických anebo zcela nových aparátů pro specifické aplikace. Absence provozních dat a zkušeností, které by mohly přispět ke kvalitnímu návrhu přímo nahrává nasazení modelování s využitím CFD. Příkladem atypického zařízení pro specifickou aplikaci může být integrovaná jednotka pro termické zpracování vzdušin znečištěných těkavými organickými látkami (VOC). S odstraňováním VOC se musí potýkat provozovatelé řady průmyslových podniků (např. lakovny, výroby léčiv, výroby plastických hmot, průmyslové čistírny odpadních vod, aj.). Díky zabudované spalovací komoře do výměníku tepla je vyvinuté zařízení velmi kompaktní a má minimální tepelné ztráty (viz Obr. 2).

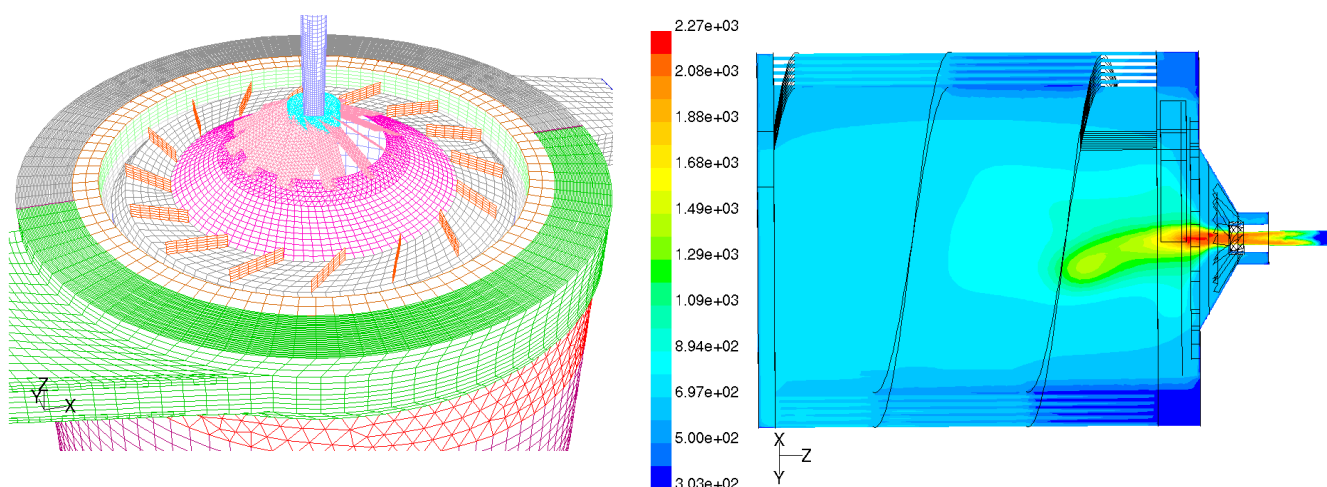


Obr. 2 - Integrovaná jednotka pro termické zpracování VOC

V tomto případě CFD posloužilo k identifikaci příčin problémů v počáteční fázi provozu zařízení a jejich následné odstranění. Jednalo se o

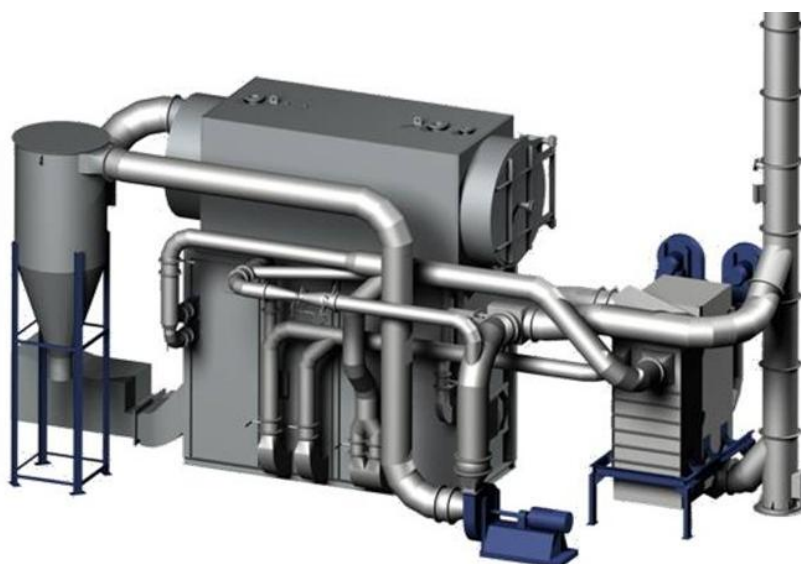
- nedokonalé spalování při nízkých výkonech stabilizačního hořáku, což vedlo ke zvýšení emisí CO,
- sníženou účinnost destrukce VOC při nízkých průtocích znečištěné vzdušiny,
- nižší přenos tepla v koaxiálním výměníku než se původně předpokládalo.

Na Obr. 3 je pro ilustraci znázorněna použitá výpočetní síť a vizualizace výsledků [6].



Obr. 3 – Výpočetní síť a vizualizace výsledků

Dalším příkladem nasazení CFD je návrh přívodu spalovacích vzduchů do spalovací komory technologické jednotky pro energetické využití různých druhů biomasy o výkonu 1 MW. Palivo, kterým jsou různé druhy biomasy, je pomocí systému dopravy transportováno na hydraulický rošt kotle, kde dochází k jeho postupnému vysoušení, pyrolýze a hoření a dohořívání. V dolní části roštu vypadává popel. Vzniklé spaliny ve směsi s pyrolýzním plynem jsou vedeny do prostoru sekundární komory, kam je přiváděn přehřátý sekundární spalovací vzduch. Zde dochází k dokonalé oxidaci všech spalitelných látek (hoření) za vývinu horkých spalin. Vzniklé spaliny jsou dále vedeny teplosměnným svazkem trubek ve výměňkové části kotle, kde předávají své teplo ohřívané topné vodě. Ochlazené spaliny odcházejí z kotle výstupním hrdlem spalin. Následně probíhá jejich dočištění od popílku v multicyklonu. Za multicyklonem je umístěn spalinový ventilátor, který je jediným hnacím zařízením celé spalinové trasy od spalovací komory až po komín. Za ventilátorem je provedena odbočka recyklu spalin. Pomocí tohoto recyklu je část spalin z výstupu kotle přivedena zpět do spalovací komory kotle, čímž se zvyšuje pyrolýzní efekt, palivo se před zapálením rychleji vysuší a zvyšuje se tak celková účinnost kotle. Za odbočkou recyklu spalin následuje přehřev sekundárního spalovacího vzduchu ve výměníku. V tomto výměníku je využito tepla spalin do maximální možné míry, ale jen tak, aby ještě nedocházelo k přílišnému zalepování spalinové strany výměníku. Snahou je ochladit spaliny na co možná nejnižší teplotu a tím eliminovat komínovou ztrátu. Spaliny ochlazené ve výměníku jsou následně vedeny do komína.



Obr. 4 - Jednotka pro energetické využití různých druhů biomasy

Během vývoje této jednotky byl způsob přívodu proudů vzduchu a recirkulovaných spalín optimalizován na základě vytvořených CFD modelů [7].

5.4 EKONOMICKÉ ASPEKTY VYUŽITÍ CFD

Z pohledu firmy hraje zásadní roli při rozhodování o nasazení modelování na bázi CFD ekonomická stránka. Klíčovou otázkou je, nakolik najde aplikace tohoto výpočtového nástroje efektivní využití při nabídkové i samotné projekční činnosti.

5.4.1 Přidaná hodnota

V rámci nabídkové činnosti je třeba zvážit, zda přidaná hodnota v podobě simulace CFD podpoří rozhodnutí investora o realizaci projektu a tudíž lze akceptovat vynaložené náklady na výpočtové činnosti (za subdodávku specializované výpočtářské firmy anebo vlastní náklady spojené s investicemi za výpočetní softwarový systém, silný hardware a osobními náklady na výpočtáře). Při nasazení CFD je také nezbytné brát v úvahu větší časovou náročnost v porovnání s běžnými výpočty. Často se v praxi díky velmi krátkým termínům pro podání nabídek stává, že pro nasazení CFD prostě není čas.

V případě nasazení modelování ve fázi projektu lze problém časové náročnosti částečně eliminovat dostatečnou alokací časového fondu v rámci plánování projektu odsouhlaseného investorem.

Pokud se firma rozhodne pro nákup výpočetního softwarového systému, nabízí se jí celá řada produktů od různých výrobců. Většina výrobců deklaruje své nabízené produkty jako univerzální, použitelné na „všechno“, co může v případě proudění tekutin nastat.

Náklady na software jsou velmi vysoké. Navíc pro efektivní výpočtářskou práci je potřeba uspokojit velké nároky softwarových systémů na silný hardware. Kromě investičních nákladů vstupují do hry i náklady provozní. Ty z největší části tvoří osobní náklady na výpočtáře a na zajištění jeho dostatečné kvalifikace. Lze předpokládat, že s vyšší kvalifikací výpočtáře, který zároveň nabyl dostatek zkušeností z průmyslové praxe, klesá riziko spojené s nespolehlivostí dosažených výsledků výpočtů.

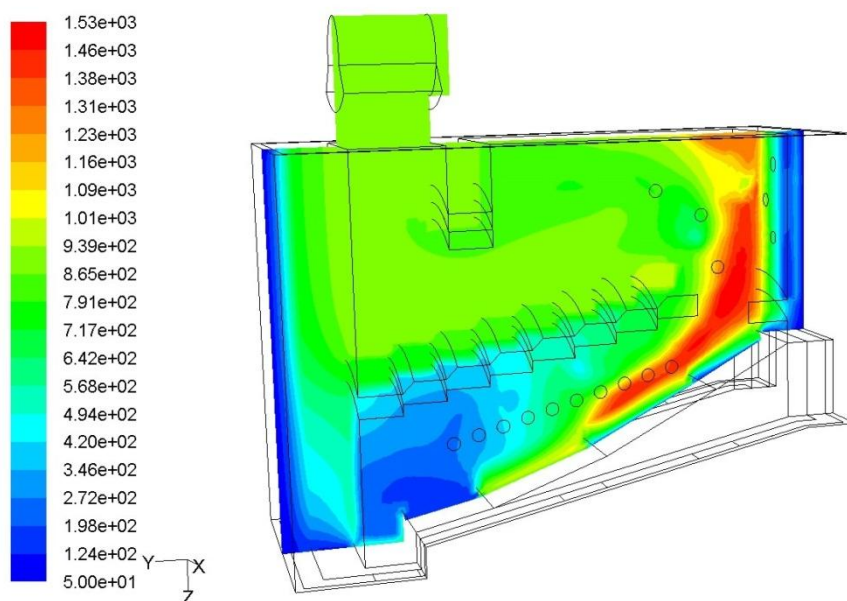
5.4.2 CFD jako nástroj obchodní a marketingové strategie

Se vzrůstajícím povědomím o možnostech CFD mezi manažery a techniky průmyslových podniků se jeho nasazení v rámci obchodně-technických nabídek stále častěji stává přidanou

hodnotou pro zákazníka. Zákazník má tak již v rámci nabídky možnost díky přehledné vizualizaci výsledků získat představu o funkci a účinnosti nabízené technologie popř. zařízení. Tímto způsobem je též možné zákazníkovi předvést, že nabízená technologie je na základě jeho požadavků vhodná, např. prostřednictvím grafického znázornění několika alternativních řešení, aby bylo z porovnání jasné, že nabízené zařízení je pro daný účel optimální. Znovu je ale nutné na základě jednoduché ekonomické analýzy rozhodnout, zda má cenu obětovat čas a vynaložit přidané náklady. V případě kladného rozhodnutí, je potřeba přidané náklady dostatečně přesně určit na základě kvalifikovaného odhadu, protože se často můžeme setkat ze strany zákazníků se značně zkreslenými představami o finanční náročnosti, které jsou pravděpodobně zapříčiněny nedostatečnou informovaností o metodice modelování s využitím CFD.

V poslední době je možné se dokonce setkat i s takovými případy, kdy zákazník již v poptávce požaduje vypracování matematického modelu na bázi CFD a v nabídce očekává prezentaci výsledků.

Přidanou hodnotu v podobě CFD simulace lze také účinně aplikovat v rámci firemní marketingové strategie při zavádění nového moderního výrobku na trh. Příkladem může být již zmiňovaná moderní technologická jednotka pro energetické využití různých druhů biomasy, kde se využití CFD při návrhu nové jednotky ukázalo jako účinné na základě zkušeností a dat získaných při provozu referenční jednotky.



Obr. 5 – Využití CFD při návrhu nové jednotky na spalování různých druhů biomasy

Na obr. 5 je pro ilustraci znázorněno teplotní pole v příčném řezu spalovací části jednotky.

5.5 Význam CFD v mezinárodních výzkumných projektech

Využití modelování na bázi CFD má zásadní význam i pro řešení mezinárodních výzkumných projektů v oblasti energetiky a zařízení pro ekologii. Cílem těchto projektů bývá zlepšení existujícího stavu s ohledem buď na zvýšení účinnosti a celkovou optimalizaci stávajících procesů a jednotek, anebo na výzkum a vývoj nových, vysoce účinných jednotek a procesů. Jedná se o oblasti, kde nasazení CFD může sehrát důležitou roli a kde lze maximálně využít jeho možností. Příkladem může být projekt na zvýšení účinnosti tepelných výměníků zařazovaných v rámci systémů využití (utilizace) tepla v technologických jednotkách. Nasazení CFD může pomoci lépe pochopit charakteristiku proudění, podmínky přenosu tepla, existenci mrtvých zón, oblasti cirkulace procesních médií, zhodnocení termické účinnosti, napomůže rovněž ke stanovení tlakových ztrát a tím tak přispěje k optimalizaci geometrie i provozních podmínek tepelných výměníků s cílem dosažení jejich maximální tepelné účinnosti.

6 PŘÍPADOVÉ STUDIE

6.1 VYUŽITÍ MODELOVÁNÍ NA BÁZI CFD U NÍZKOEMISNÍCH HOŘÁKŮ

6.1.1 Úvod

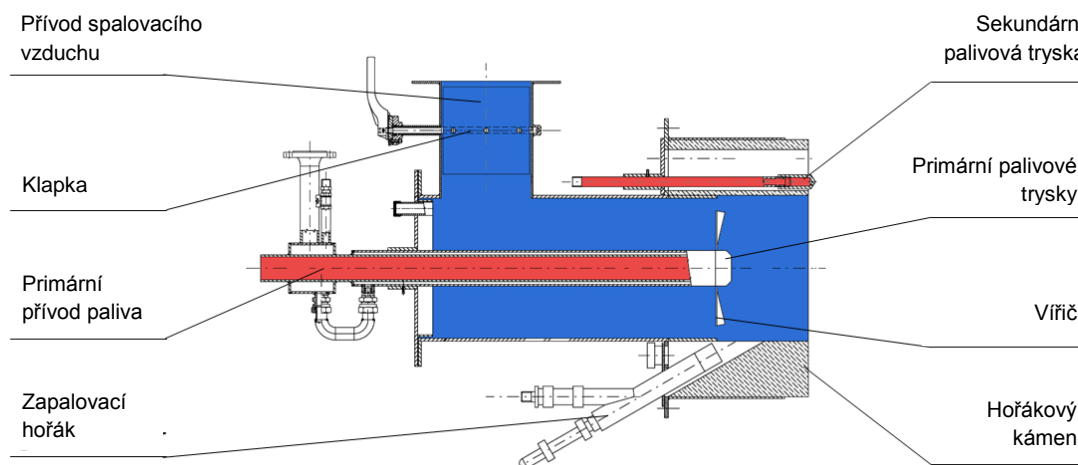
Návrh nových hořáků bývá často založen na dlouhodobých zkušenostech konstruktérů. Navíc bývají nové hořáky před nasazením do průmyslové praxe testovány ve zkušebnách. Nicméně tento přístup je omezen jak ekonomickými faktory (nákladná výroba prototypu a samotných zkoušek), tak i technickými (možnosti zkušebny). Z toho důvodu se hledají nové alternativy pro částečnou popř. kompletní náhradu fyzických zkoušek pomocí moderních výpočetních nástrojů.

Současné výpočetní metody pro predikce toku tekutin zahrnující chemické reakce a tepelné pochody umožňují komplexní simulace hořáků. Na druhou stranu nemusí být tyto výpočetní metody stoprocentně spolehlivé a je potřeba si být vědom jejich silných a slabých stránek [1]. Kromě toho je nutné ověřovat přesnost predikcí pomocí zkušebních měření.

Tato případová studie se věnuje matematickému modelování moderního nízkoemisního hořáku. Hořák byl navržen jako dvoustupňový s potlačenou tvorbou NO_x . Díky jeho sofistikované konstrukci je možné jednoduše modifikovat nastavení palivových trysek za účelem optimálního provozu ve smyslu minimálních emisí NO_x . Z jiného pohledu tento hořák představuje ideální nástroj, který může být použit pro ověření řady výpočtových modelů různých provozních a konstrukčních parametrů.

6.1.2 Konstrukce zkušební hořáku

Dvoustupňové konstrukční uspořádání hořáku je patrné z Obr. 6. Hořák je určen pro spalování zemního plynu. Nominální výkon se pohybuje od 0,5 do 1 MW podle typu instalovaných tryskových hlav. Primární trysková hlavice je namontována hořákovém kopí. Je osazena 12 tryskami, přičemž 4 trysky mají průměr 3 mm a 8 trysek 2,6 mm. Zemní plyn vstupuje do spalovací komory skrz 4 sekundární tryskové hlavice, které jsou pravidelně rozmístěné na čelní straně hořákového kamene. Pozice sekundárních trysek může být modifikována axiálně, radiálně i tangenciálně. Na Obr. 9 je znázorněno základní uspořádání sekundárních trysek, které jsou umístěny v nejbližší poloze vzhledem k hořákovému kopí na nejnižší axiální úrovni.



Obr. 6 - Zkušební hořák

Spalovací vzduch je do hořáku přiváděn vzduchovým kanálem kruhového průřezu. Celkové množství spalovacího vzduchu je možné řídit klapkou na vstupním vzduchovém kanále. Hořák je rovněž vybaven vířičem, který zabraňuje utržení popř. vyhasnutí plamene.

Hořák je instalován ve zkušební spalovací komoře. Spalovací komora je 4 m dlouhá horizontální válcová nádoba s vnitřním průměrem 1 m. Vnitřní plášť komory je částečně izolován pomocí izolačních panelů na bázi hlinito-křemičitých vláken. V prostoru mezi vnějším a vnitřním pláštěm spalovací komory proudí chladicí voda. Aby bylo dosaženo rovnoměrného chlazení, je průtok chladicí vody rozdělen do sedmi axiálních sekcí. Proud chladicí vody je usměrňován pomocí plechových plátů tvořících šroubovici přivařených na vnitřní plášť komory. Spalovací komora je vybavena 16 inspekčními otvory, 8 na každé straně, které jsou rovnoměrně umístěny po délce komory. Na výstupu z komory odchází spaliny spalínovodem do komína.

6.1.3 Výpočetní model

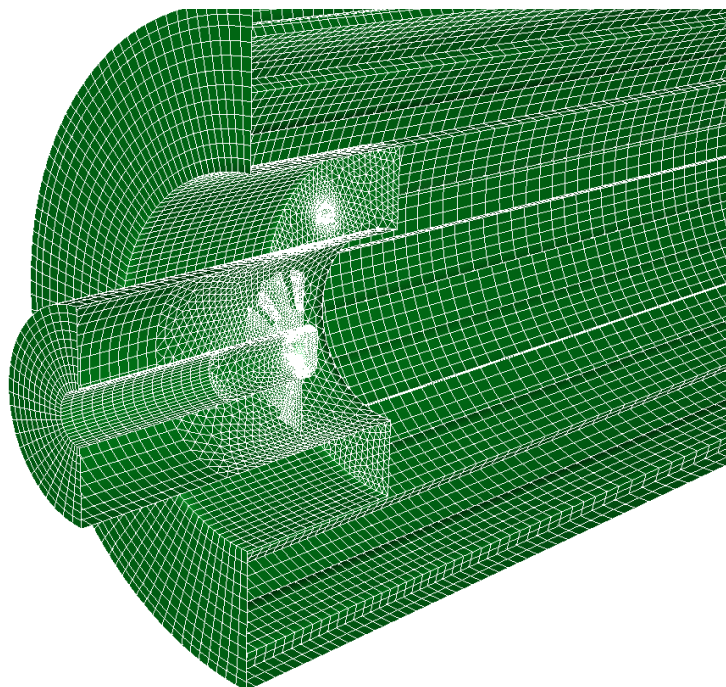
Výpočetní model byl sestaven v komerčním CFD software FLUENT, verze 6.2.16 [8], s využitím zabudovaných submodelů a algoritmů. Výpočtová síť geometrického modelu byla vytvořena pomocí software GAMBIT 2.2.30 [9] (viz Obr. 7)

V rámci modelování byly zahrnuty následující zjednodušující předpoklady. Vstupní kanál spalovacího vzduchu nebylo modelováno. Zjednodušení se opírá o předpoklad, že tok spalovacího vzduchu nebude výrazně ovlivňován. Navíc, instalovaný víříč zajišťuje homogenní turbulentní tok spalovacího vzduchu. Tedy, na základě tohoto zjednodušení, se geometrie modelu stává symetrickou a pro účely simulace stačí pouze čtvrtinový model. To vede k menšímu počtu buněk geometrické sítě, lepší výpočtové stabilitě a zkrácení výpočtového času. Dalším zjednodušením geometrie bylo vynechání inspekčních otvorů v komoře, stejně jako modelování plášťového meziprostoru s chladicí vodou. Vodní chlazení bylo modelováno jako okrajová podmínka konstantní teploty stěny.



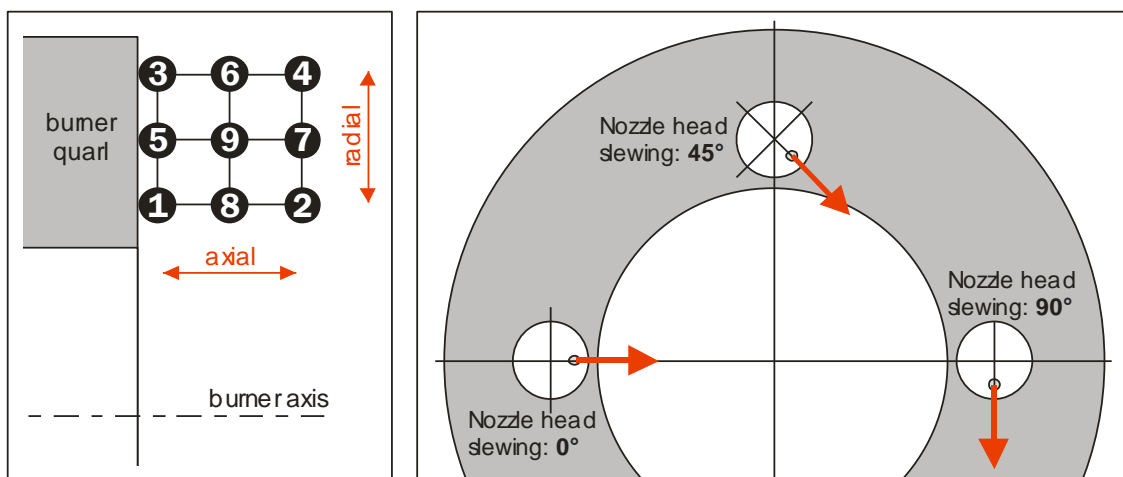
Obr. 7 - Geometrie hořáku a spalovací komory

Povrch výpočtové sítě je zobrazen na Obr. 8. V okolí složitějších tvarů jako např. palivových trysek byly použity tetraedrické elementy, na ostatních místech byly použity hexaedrické/klínové elementy. Celá geometrická síť je tvořena cca 110 000 buňkami. Síť v oblasti primárních a sekundárních trysek a v oblasti plamene je jemnější za účelem zjednodušení výpočtu předpokládaných velkých gradientů nezávislých proměnných. Zbytek výpočetní sítě byl hrubší, protože zde nebyly předpokládány žádné významné gradienty.



Obr. 8 - Výpočtová síť

Za účelem nalezení optimálního uspořádání sekundárních palivových trysek ve smyslu minimální tvorby emisí NO_x , byla připravena sada 27 (9×3) alternativních uspořádání sekundárních trysek. Očíslované pozice na Obr. 9 představují 9 alternativních pozic jedné trysky v axiálním a radiálním směru. Navíc bylo k výše uvedeným alternativám přidány tři varianty natočení trysek, a to 0° , 45° a 90° .



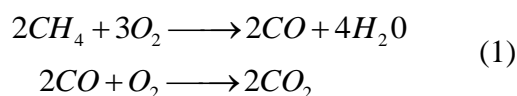
Obr. 9 - Alternativy uspořádání palivových trysek

V rámci simulace byly zavedeny a vyřešeny následující rovnice:

- rovnice kontinuity,
- tři rovnice přenosu hybnosti,
- rovnice přenosu energie,
- pět rovnic přenosu druhů,
- dvě přenosové rovnice modelu turbulence.

Turbulentní proudění bylo modelováno prostřednictvím dvou rovnicového modelu SST k- ω [10]. Použití tohoto modelu je výhodné díky jeho stabilitě během výpočtu [9] a současně v porovnání s ostatními dvěma rovnicovými modely turbulence nabízí porovnatelnou přesnost [12].

Chemické reakce byly modelovány pomocí následujícího zjednodušeného dvou krokového modelu pro spalování metanu:



Rychlosti chemických reakcí byly vypočítávány pomocí tzv. eddy-dissipation modelu Magnusena a Hjertagera [13], který vztahuje rychlost reakcí vzhledem k lokálním vlastnostem turbulence (reprezentující intenzitu turbulentního promíchání).

Přenos tepla radiací byl modelován tzv. DO-modelem přizpůsobeným pro nestrukturované sítě [14], který nabízí přesné predikce za přijatelných nároku na využití procesoru.

Okrajové podmínky byly použity tyto:

- vstupní hmotnostní tok paliva do primárních a sekundárních trysek
- vstupní hmotnostní tok primárního a sekundárního spalovacího vzduchu
- tlak na výstupu spalin
- konstantní teplota stěny pro vodou chlazený plášť komory

Desky vnitřní izolace spalovací komory byly modelovány jako tepelně vodivá pevná tělesa.

Simulační výpočty byly provedeny pro kompletní sadu 27 alternativ různých uspořádání sekundárních trysek. Pár alternativ dosáhlo stabilní a rychlé konvergence, nicméně, výpočet většiny alternativ byl přerušen po zhruba 10 000 iterací, když bylo dosaženo přijatelné úrovně konvergence. Poté, na základě výsledků výpočtu, byly provedeny simulační výpočty tvorby NO_x [14]. Vzhledem ke skutečnosti, že palivo neobsahuje žádný chemicky vázaný dusík, byla tvorba NO_x přisouzena následujícím dvěma mechanismům:

- termický (Zeldovich) mechanismus,
- a promptní mechanismus.

6.1.4 Analýza výsledků

Primárně sledovanými parametry byly výstupní koncentrace emisí NO_x a rovněž teplota výstupních spalin. Tyto parametry jsou shrnuty v Tab. 1. Axiální a vertikální pozice trysek jsou označeny stejným způsobem jako je na Obr. 9. Údaje uvedené nad a vedle výsledných hodnot představují průměrné hodnoty vypočtené z příslušných sloupců nebo řádek. Tabulka je rozdělena do tří částí podle natočení trysek – 0° , 45° a 90° . Ze zobrazených údajů je možné vypočítat, že emise NO_x se různí pouze minimálně v závislosti na axiální pozici sekundárních trysek. Na druhou stranu se ale emise NO_x výrazně liší v závislosti na radiální pozici a úhlu natočení trysek.

Nozzle Head Slewing: 0°									
T [K]	1132,5			1097,5			1065,3		Average
NOx [ppm]	25,3			17,3			19,7		
T [K]	2	1138,2		7	1093,95		4	1072,4	1101,5 T [K]
NOx [ppm]		25			18			22	
T [K]	8	1130,4		9	1096,02		6	1066,78	1097,7 T [K]
NOx [ppm]		25			18			19	
T [K]	1	1128,89		5	1102,53		3	1056,65	1096,0 T [K]
NOx [ppm]		26			16			18	
									20,7 NOx [ppm]
									20,0 NOx [ppm]

Tab. 1 - Výsledky výpočtu - natočení trysek 0°

V případě úhlu natočení trysek rovnajícimu se 0 ° odpovídá nejvyšší koncentrace emisí NO_x (26 ppm) pozici trysek nejbližší hořákovému kopí (pozice 1). Na druhou stranu alternativa č. 5 reprezentuje umístění trysky s nejnižší koncentrací emisí NO_x (16 ppm), přičemž se nachází hned vedle pozice č. 1. Obě jsou umístěny na stejné axiální úrovni.

Nozzle Head Slewing: 45°									
T [K]	1060,0			1055,7			1057,8		Average
NOx [ppm]	15,3			24,3			28,3		
T [K]	2	1062,78		7	1053,41		4	1054,9	1057,0 T [K]
NOx [ppm]		18			21			28	
T [K]	8	1066,44		9	1055,81		6	1054,53	1058,9 T [K]
NOx [ppm]		16			27			28	
T [K]	1	1050,71		5	1057,82		3	1063,89	1057,5 T [K]
NOx [ppm]		12			25			29	
									22,3 NOx [ppm]
									23,7 NOx [ppm]
									22,0 NOx [ppm]

Tab. 2 - Výsledky výpočtu - natočení trysek 45°

Naproti tomu, v případě úhlu natočení trysek rovnajícimu se 45° odpovídá nejvyšší koncentrace emisí NO_x (29 ppm) tryskám nejvíce vzdáleným od hořálového kopí (pozice č. 3). Pozice č. 1 reprezentuje celkovou minimální koncentraci emisí NO_x (12 ppm).

Nozzle Head Slewing: 90°					
T [K]	1069,1	1068,8	1065,6	Average	
NO _x [ppm]	31,0	30,7	31,0		
T [K]	2 1070,06	7 1069,57	4 1066,84	1068,8	T [K]
NO _x [ppm]	29	33	33	31,7	NO _x [ppm]
T [K]	8 1068,72	9 1068,27	6 1065,38	1067,5	T [K]
NO _x [ppm]	32	29	29	30,0	NO _x [ppm]
T [K]	1 1068,56	5 1068,52	3 1064,46	1067,2	T [K]
NO _x [ppm]	32	30	31	31,0	NO _x [ppm]

Tab. 3- Výsledky výpočtu - natočení trysek 90°

Z posledního případu (úhel natočení trysek = 90 °) je patrné, že jsou hodnoty koncentrací emisí NO_x x mírně vyšší v porovnání s výše uvedenými případy. Průměrná koncentrace emisí NO_x je v tomto případě 30,9 ppm v porovnání s 22,7 ppm u natočení 45° a 20,8 ppm v případě natočení 0°.

6.1.5 Závěr

Tato případová studie demonstruje jednu z možností využití CFD ve smyslu nalezení optimálního uspořádání sekundárních palivových trysek u experimentálního hořáku na zemní plyn. Sada alternativních uspořádání byla analyzována s ohledem na tvorbu emisí NO_x. Na základě analýzy výsledků výpočtů byla nalezena alternativa odpovídající minimální tvorbě NO_x. Tato případová studie je ovšem pouze prvním krokem komplexní optimalizace experimentálního hořáku.

Další kroky tedy směřovaly k ověření spolehlivosti CFD predikcí. Konkrétně se jednalo o provedení měření extrakce tepla po délce spalovací komory a následné porovnání vypočtených a naměřených hodnot a tím o ověření spolehlivosti CFD predikcí. Měření bylo možné provádět díky speciálnímu konstrukčnímu řešení spalovací komory, jejíž plášť je rozdělen do několika segmentů s odděleným vodním chlazením. O tomto je pojednáno v následující případové studii.

6.2 OVĚŘENÍ MODELOVÁNÍ CFD

6.2.1 Úvod

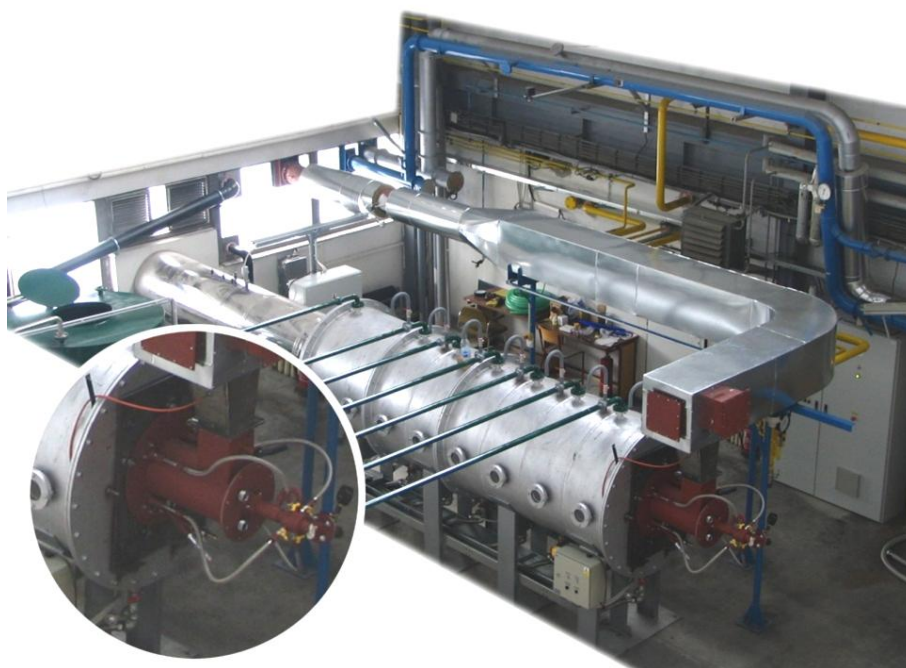
Při návrhu průmyslových spalovacích zařízení hraje významnou roli správná predikce teplotních profilů na stěně a tepelných toků skrz stěnu daného zařízení. K tomuto účelu se přímo nabízí využití počítačové podpory CFD (Computational Fluid Dynamics). Na druhou stranu je spolehlivost takovýchto predikcí těžko ověřitelná, a proto se konstruktéři spalovacích zařízení raději přiklánějí k využití dlouholetých praktických zkušeností než k detailním CFD predikcím.

V rámci této případové studie byla opět jako v předchozím případě využita nová zkušebna hořáků (vybudovaná na ÚPEI v průmyslovém měřítku) pro provedení měření extrakce tepla po délce spalovací komory. Měření je možné provádět díky speciálnímu konstrukčnímu řešení spalovací komory, jejíž plášť je rozdělen do několika segmentů s odděleným vodním chlazením. Toto dává možnost porovnat naměřená a vypočtená data lokální extrakce tepla spalovací komory a tím tak ověřit spolehlivost CFD predikcí.

Tento příspěvek se věnuje dalším krokům v rámci komplexního úkolu optimalizace geometrie hořáku s potlačenou tvorbou NO_x . Předchozí kapitola se zabývala nalezením vhodné alternativy geometrického uspořádání sekundárních palivových trysek. Je ale důležité podotknout, že se jednalo pouze o výsledky matematického modelování, které nebyly experimentálně ověřeny. Další kroky tedy směřovaly k ověření spolehlivosti CFD predikcí. Konkrétně se jednalo o provedení měření extrakce tepla po délce spalovací komory. Porovnání vypočtených a naměřených hodnot extrakce tepla je možné díky speciálnímu konstrukčnímu řešení spalovací komory.

6.2.2 Experimentální zařízení

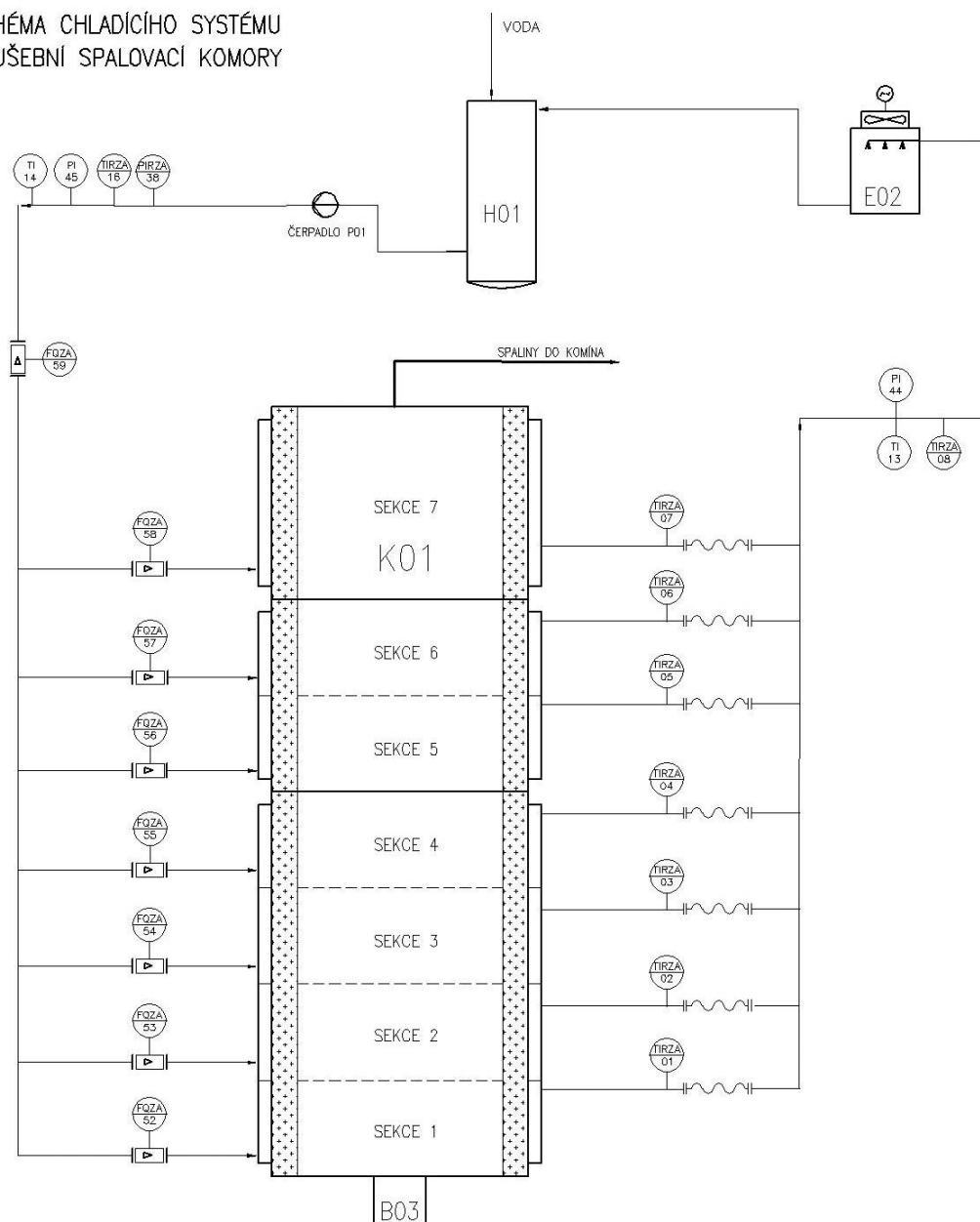
Spalovací komora je válcový aparát s horizontální osou, jehož plášť je rozdělen do několika segmentů s odděleným vodním chlazením. Původně byla vnitřní část vnitřního pláště částečně pokryta izolačními deskami na bázi hlinito-křemičitých vláken v pravidelném uspořádání. Při prvním testování hořáků se ukázalo, že tyto izolační desky brání odvodu tepla víc, než se původně počítalo a proto byly z prostoru komory demontovány. Nebudeme se zde dále zabývat podrobnějším technickým popisem konstrukce spalovací komory. To, co nás bude nyní zajímat s ohledem na měření extrakce tepla, je samotný chladicí systém spalovací komory.



Obr. 10 – Experimentální zařízení – zkušebna hořáků

Chladicí voda je čerpána z nádrže H01 pomocí odstředivého čerpadla P01 a je vedena do distributoru. Distributor slouží k rozdělení chladicí vody mezi jednotlivé chladicí segmenty spalovací komory. Chladicí voda natéká shora do meziplášťového prostoru. V meziplášťovém prostoru je tok kapaliny částečně usměrňován pomocí spirálně vedených plechů tak, aby byl zajištěn lepší přenos tepla. V rámci chlazení nedochází v žádném z chladicích segmentů k odpařování vody. Horká voda vystupuje ve spodní části spalovací komory. Horká chladicí voda z jednotlivých segmentů se opět setkává v kolektoru. Z kolektoru proudí horký proud do venkovní chladicí věže E02, kde dochází k jeho ochlazení okolním vzduchem. Ochlazená voda natéká zpět do zásobní nádrže, čímž se chladicí okruh uzavírá. Výše popsany chladicí okruh je patrný z Obr. 11.

SCHÉMA CHLADÍČÍHO SYSTÉMU
ZKUŠEBNÍ SPALOVACÍ KOMORY



Obr. 11 - Schéma okruhu vodního chlazení zkušební spalovací komory

K01 – Zkušební spalovací komora s chlazeným pláštěm rozděleným na 7 sekcí,
B03 – experimentální hořák, H01 – zásobní nádrž chladicí vody, E02 – chladicí věž, P01 -
čerpadlo

Jak je patrné z výše uvedeného obrázku je v rámci jednoho chladicího segmentu každá větev
chladicí vody mezi distributorem a kolektorem osazena instrumentací na měření výstupní
teploty (TIRZA01-07) a průtokoměrem (FQZA52-58). Vstupní teplota chladicí vody je

měřena v před distributorem pomocí TIRZA16. Signály z těchto čidel jsou přenášeny do řídicího systému. Z naměřených hodnot teplot a průtoků je možné dopočítat tepelnou bilanci chladicí vody pro jednotlivé segmenty a určit tak extrakci tepla pláštěm spalovací komory.

6.2.3 Měření extrakce tepla

Měření bylo provedeno při následujícím provozním režimu zkušební spalovací komory:

Hořák	
Výkon	1231 kW
Průtok zemního plynu	123,7 Nm ³ /h
Tlak zemního plynu	97,6 kPa
Průtok spal. vzduchu	1422 Nm ³ /h
Tlak spal. vzduchu	235,5 Pa
Spalovací komora	
Podtlak	-106,4 Pa

Tab. 4 - Provozní parametry při provádění měření

Na straně chladicí vody byly naměřeny údaje, které jsou uvedeny v Tab. 5. Z naměřených hodnot průtoků, vstupních (T_{in}) a výstupních (T_{out}) teplot byl pomocí tepelné bilance vypočítán odvedený tepelný výkon v jednotlivých chladicích segmentech. Při výpočtech byla uvažována měrná tepelná kapacita vody za konstantní ($c_{p_{voda}} = 4,18 \text{ kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$).

Sekce	Jednotka	sekce 1	sekce 2	sekce 3	sekce 4	sekce 5	sekce 6	sekce 7	Suma
Délka sekce	m	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	1,0	4
Průtok	m ³ /h	7,2	7,1	7,4	7,5	7,4	7,3	7,5	51,4
	kg/s	2,0	2,0	2,1	2,1	2,1	2,0	2,1	
T_{in}	°C	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	21,8	

T_{out}	°C	25,8	30	33,8	33,5	33,1	30,9	34,8	
ΔT	°C	4,0	8,2	12,0	11,7	11,3	9,1	13,0	
c_p	kJ/(kg.K)	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	4,18	
Odvedený výkon	kW	33,4	67,6	103,1	101,9	97,1	77,1	113,2	593,5
Tepelný tok	kW/m ²	21,3	43,0	65,6	64,9	61,8	49,1	36,0	47,2

Tab. 5 - Chladicí voda - Naměřené hodnoty a bilanční údaje

Celkový odvedený tepelný výkon je dán sumací dílčích tepelných výkonů v jednotlivých chladících segmentech. Tepelný tok je odvedený tepelný výkon vztažený k ploše výměny tepla.

6.2.4 Výpočet extrakce tepla

Detailní popis přípravy výpočetního modelu spalovací komory a samotného výpočetního postupu byl uveden v předchozí kapitole. Za účelem ověření spolehlivosti výpočetních predikcí a pro získání lepšího přehledu o vlivu matematických modelů na výsledky výpočtu a různých geometrií modelů byly výpočty provedeny v následujících alternativách:

A) Výpočetní model zahrnující geometrii celé komory včetně přívodu spalovacího vzduchu, přičemž byly aplikovány modely turbulence $k-\omega$ nebo RSM. Pro dosažení vyšší přesnosti výsledků byla pro výpočty použita diskretizační schémata druhého řádu a to v obou případech aplikovaných modelů. U této varianty byl aplikován jedno-krokový mechanismus spalování metanu.

B) Čtvrtinový geometrický model komory, hořáku včetně vířiče s homogenním vstupem spalovacího vzduchu. Stejně jako u předchozí alternativy byly aplikovány modely turbulence $k-\omega$ nebo RSM a byla použita diskretizační schémata druhého řádu. U této varianty byl aplikován dvou-krokový mechanismus spalování metanu.

Po ukončení výpočtu byly pomocí výpočetního software FLUENT [8] přímo z modelu odečteny hodnoty odvedeného tepla v jednotlivých segmentech. V případě čtvrtinového modelu je nutné odečtené hodnoty vynásobit na celý model, aby bylo možné vypočtené a naměřené hodnoty dále porovnávat. Odvedené teplo vztažené k ploše výměny tepla, tedy

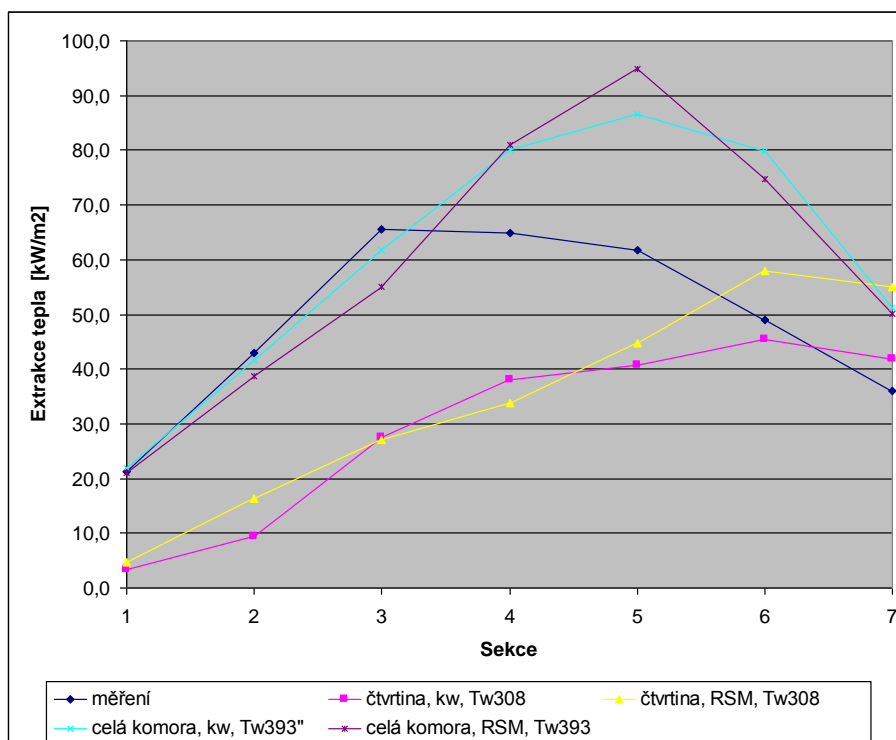
ploše pláště příslušného segmentu, představuje tepelný tok. Vypočtené hodnoty tepelných toků v jednotlivých segmentech jsou patrné z tabulky č. 3.

A) Celá komora, přívod spalovacího vzduchu								
k- ω -2o-1step	kW/m ²	21,84	41,72	61,66	80,09	86,62	79,82	51,17
RSM-2o-1step	kW/m ²	21,13	38,74	55,01	80,94	94,92	74,82	50,14
B) Čtvrtina, periodická, homogenní přívod spalovacího vzduchu s vířičem								
k- ω -2o-2step	kW/m ²	3,29	9,42	27,45	38,13	40,82	45,49	41,90
RSM-2o-2step	kW/m ²	4,77	16,26	27,08	33,76	44,80	57,85	55,04

Tab. 6 - Vypočtené tepelné toky alternativy A a B

6.2.5 Ověření spolehlivosti CFD predikcí

Pro ověření spolehlivosti CFD predikcí tepelné extrakce přes plášť spalovací komory byly porovnány výše uvedené naměřené a vypočtené hodnoty tepelných toků. Porovnání výsledků je patrné z grafu na Obr. 12.



Obr. 12 - Porovnání naměřených a vypočtených údajů

Jak je na první pohled patrné, naměřené a vypočtené hodnoty se od sebe značně rozcházejí. Bohužel je rovněž patrný i velký rozdíl mezi jednotlivými vypočtenými tepelnými toky v případě čtvrtinového a celého výpočtového modelu. Trend průběhu extrakce tepla po délce komory je lépe zachycen v případě modelu celé komory. V tomto případě jsou výsledky uspokojivé v prvních třech sekcích, kde dochází k dobré shodě mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami. Ovšem v následujících sekcích roste vypočtený tepelný tok a nabývá nejvyšší hodnoty v 5 sekci, což je ovšem v rozporu s naměřenými hodnotami tepelného toku, který nabývá nejvyšších hodnot ve třetí sekci. Pravděpodobnou příčinou je posunutí plamene do zadní části komory v případě výpočtového modelu.

K ještě většímu rozdílu mezi vypočtenými a naměřenými hodnotami dochází v případě čtvrtinového modelu. V tomto případě je trend průběhu extrakce tepla zcela odlišný od měření a tudíž jsou výsledky zcela neuspokojivé. Ve 3. sekci se vypočtený měrný tepelný tok liší dokonce o - 38 kW (jak při použití $k-\omega$ tak i RSM modelu turbulence) oproti naměřené hodnotě.

6.2.6 Závěr

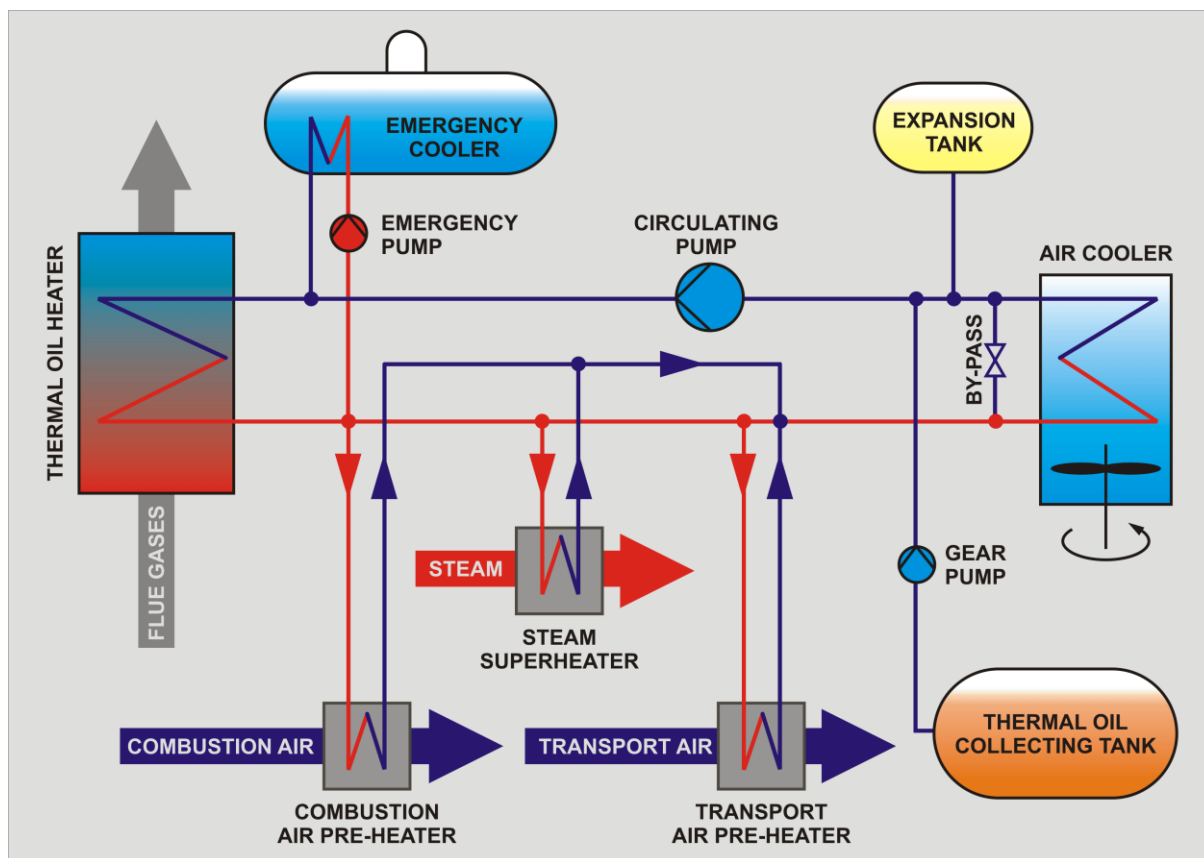
Z výše uvedené analýzy vyplývá, že nedochází k uspokojivé shodě mezi naměřenými a vypočtenými daty. Lepšího přiblížení k naměřeným hodnotám dosahujeme při použití výpočtového modelu celé komory. Bohužel u obou variant nedošlo k uspokojivému zachycení trendu extrakce tepla podél délky spalovací komory. Z tohoto pohledu vyplývá, že představené výpočtové modely nejsou pro účely spolehlivé predikce vyhovující. Pro dosažení lepší shody musíme provést zpětnou analýzu modelu, identifikovat vlivy, které mohou být zásadní pro získání spolehlivých výsledků. Mezi vlivy může patřit správná volba modelu spalování. Dokonce podle [16] může i způsob iniciace spalování mít vliv na výsledky výpočtu a je tedy nutné i tento předpoklad na představeném modelu dokázat nebo vyvrátit. Mezi další faktory může také patřit, jak je namodelován přívod spalovacího vzduchu do prostoru, kde dochází k hoření, neboť i charakteristika proudění spalovacího vzduchu má významný vliv na proces spalování.

6.3 VÝMĚNÍK TERMOOLEJ/SPALINY

6.3.1 Úvod

Dalším příkladem aplikace CFD je při řešení problému zanášení rekuperačního výměníku termoolej/spaliny.

V rámci technologie spalovny průmyslových kalů z čistírny průmyslových odpadních vod je zařazen systém utilizace tepla spalin. Jako teplonosného média se využívá termoolej. Přenos tepla z proudu spalin do termooleje probíhá v hlavním výměníku. Teplo se pak v rámci technologie využívá pro predehřev spalovacího a dopravního vzduchu a pro přehřívání technologické páry. Princip je patrný z Obr. 13.



Obr. 13 - Zjednodušené technologické schéma systému utilizace tepla spalin

Hlavní výměník je rekuperační s křížovým tokem. Skládá se ze dvou identických modulů trubkových registrů. Trubky jsou rozmístěny za sebou bez přesazení. Spaliny proudí v mezitrubkovém prostoru a termoolej v trubkách. Uspořádání trubek je horizontální, tok spalin je vertikální ze spodní části výměníku nahoru. Tepelný výkon výměníku je 4 MW (2 + 2 MW).

6.3.2 Popis problému

Při provozování dochází ke značnému zanášení popílkem ze spalování kalů a to především spodního registru. Popílek ulpívá na trubkách společně s nežádoucím produktem selektivní nekatalytické redukce oxidů dusíku, síranem amonným. Vzniká tak křehká krusta, která značným způsobem zhoršuje přenos tepla. To představuje zásadní problém, neboť výměník tvoří jádro systému utilizace tepla a nedostatečný výkon má negativní vliv na funkci celé technologie (nedostatečný předehřev spalovacího vzduchu pro pecní hořáky, nedostatečné přehřátí atomizační páry pro hořáky na kapalné palivo). Díky tomuto jevu nedochází ke snížení teploty spalin na požadovanou teplotu na vstupu do systému čištění spalin, a proto je

nutné technologii odstavit a registry zbavit nánosů. Časté odstávky ovšem způsobují značné potíže. Především není možné spalovat kaly, přičemž jejich množství neustále přibývá a provozní kalové zásobníky mají omezenou kapacitu. Rovněž, jak bude patrné z následné analýzy, představuje každá odstávka značné finanční náklady. V neposlední řadě způsobují odstávky zkrácení životnosti zařízení, především vyzdívek, které jsou tak vystavovány častým tepelným změnám. K řešení se nabízí využít možnosti CFD modelování.

Výsledky simulace umožnily „nahlédnout dovnitř“ trubkového prostoru a analyzovat proudění spalin skrz trubkový had a určit místa, kde dochází k největší tvorbě nánosů.

6.3.3 Navrhovaná řešení

Z toho důvodu bylo nutné navrhnout vhodná opatření, která by zabránila nebo alespoň zmírnila zanášení. Byla navržena tato dvě řešení:

1. Instalace zvukového ofukovače teplosměnných ploch
2. Instalace speciálně konstruované vestavby na základě simulace CFD

Ad 1) Do volného prostoru mezi dvěma moduly výměníku byl instalován zvukový ofukovač. Zvukové vlny vygenerovány zvukovým ofukovačem se v prostoru šíří všemi směry. Při dopadu na čištěný povrch dochází k rozechvění usazených částic popela. Tyto částice jsou dále odnášeny a čištěný povrch tak zůstává bez usazenin. Ofukovač je napojen na zdroj tlakového vzduchu. Provoz ofukovače je periodický dle nastaveného časového limitu v řídicím systému.

Ad 2) S podporou CFD byla navržena speciální vestavba tak, aby ovlivňovala tok spalin s cílem minimálního zanášení teplosměnných ploch. Samotný konstrukční návrh se opíral o vizuální výsledky simulace rychlostních profilů. Ocelová vestavba byla instalována vertikálně do prostoru mezi jednotlivé sloupce trubek. Vestavba byla vybavena speciálně tvarovanými „lopatkami“, které usměrňují tok spalin požadovaným způsobem.

6.3.4 Ekonomická rozvaha

Následující ekonomické údaje porovnávají obě varianty s původním stavem. Ekonomické výpočty jsou založeny na vyčíslení nákladů spojených s odstávkou technologie a nákladů spojených s realizací výše uvedených opatření. Nejsou uvažovány náklady ušlé příležitosti. Vychází se z pragmatického předpokladu, že primárním účelem spalovny je spalování kalů,

k čemuž během odstávek nedochází. Rezervní kapacity zásobních nádrží kalu včetně následného provozování spalovny na maximální výkon není uvažováno díky tomu, že jsou s tím spojené náklady prakticky nekvantifikovatelné.

Nejprve jsou v následující tabulce vypočteny náklady spojené s odstávkou technologie.

odstavení spalovny				21 600 Kč
	kg/100m ²	m ²	Kč/kg	
sorbent na zaprášení filtru	25	700	12	2 100 Kč
	kWh	Kč/kWh	hod.	
elektrická energie	75	5	12	4 500 Kč
	kg/hod	Kč/kg	hod.	
lehký topný olej	150	15	4	9 000 Kč
	kg/hod	Kč/kg	hod.	
lehký topný olej	50	15	8	6 000 Kč
odstávka				12 000 Kč
	hod.sazba	počet prac.	počet hodin	
čištění výměníku	300	3	10	9 000 Kč
ostatní				3 000 Kč
najetí spalovny				18 600 Kč
	kg / 100 m ²	m ²	Kč/kg	
zeolit na zaprášení filtru	25	700	12	2 100 Kč
	kWh	Kč/kWh	hod.	
elektrická energie	75	5	12	4 500 Kč
	kg/hod	Kč/kg	hod.	
lehký topný olej	150	12	4	7 200 Kč
	kg/hod	Kč/kg	hod.	
lehký topný olej	50	12	8	4 800 Kč
náklady celkem				52 200 Kč

Tab. 7 - Náklady na odstávku

V nákladech na odstávku nejsou mimo jiné zahrnuty osobní náklady na operátory, jejichž měsíční plat je fixní a není vypočítáván na základě skutečně odpracovaných hodin popř. provozu spalovny. Rovněž nejsou započteny náklady ušlé příležitosti za nespálený kal.

Investiční a provozní náklady v 1. roce	investiční náklady	provozní náklady	odstávka		roční náklady
	celkem	celkem/rok	Počet /rok	celkem za rok	celkem
Varianta I – bez opatření	0 Kč	0 Kč	8	417 600 Kč	417 600 Kč
Varianta II – vzduchové dělo	137 200 Kč	79 800 Kč	4	208 800 Kč	425 800 Kč
Varianta III – CFD + vestavba	351 800 Kč	0 Kč	2	104 400 Kč	456 200 Kč

Tab. 8 - Investiční a provozní náklady v prvním roce

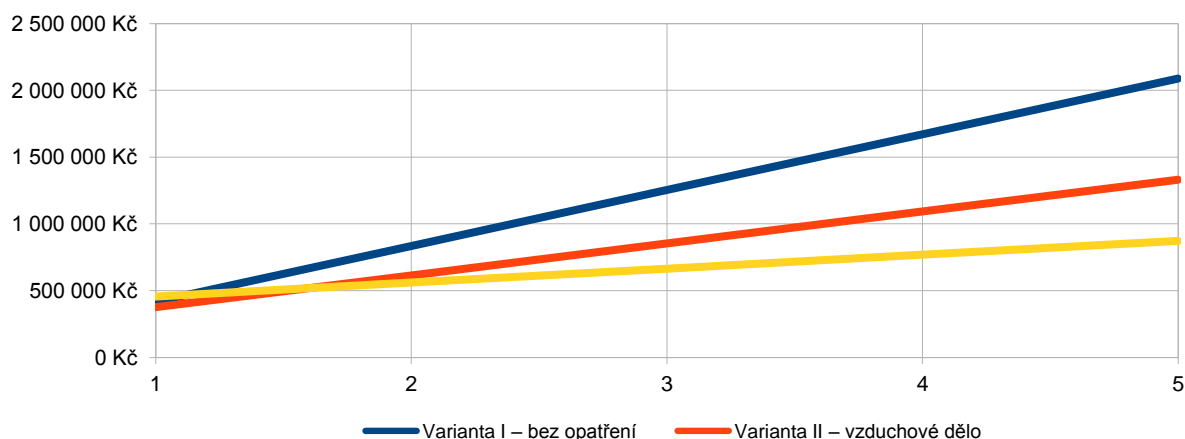
Investiční náklady u Varianty II tvoří dodávka na klíč zvukového ofukovače včetně montáže a uvedení do provozu. U Varianty III se jedná o provedení simulačních výpočtů a dodávku na klíč navržené vestavby včetně montáže. Provozní náklady u Varianty II tvoří spotřebovaný tlakový vzduch. Zvýšené provozní náklady na provoz spalínového ventilátoru jsou zanedbány z důvodu jejich obtížného stanovení. Prakticky platí, že tlaková ztráta vestavby s nižším stupněm zanášení teplosměnných ploch odpovídá tlakové ztrátě zanesených teplosměnných ploch.

U každého případu byly ve výpočtu nákladů odečteny dvě pravidelné roční odstávky, během nichž se současně čistí výměník.

Další tabulka představuje roční náklady vyjádřené kumulovaně pro jednotlivé varianty v období pěti let.

Roční náklady kumulovaně	1.rok	2.rok	3.rok	4.rok	5.rok
Varianta I – bez opatření	417 600 Kč	835 200 Kč	1 252 800 Kč	1 670 400 Kč	2 088 000 Kč
Varianta II – vzduchové dělo	425 800 Kč	714 400 Kč	1 003 000 Kč	1 291 600 Kč	1 580 200 Kč
Varianta III – CFD + vestavba	456 200 Kč	560 600 Kč	665 000 Kč	769 400 Kč	873 800 Kč

Tab. 9 - Roční náklady kumulovaně

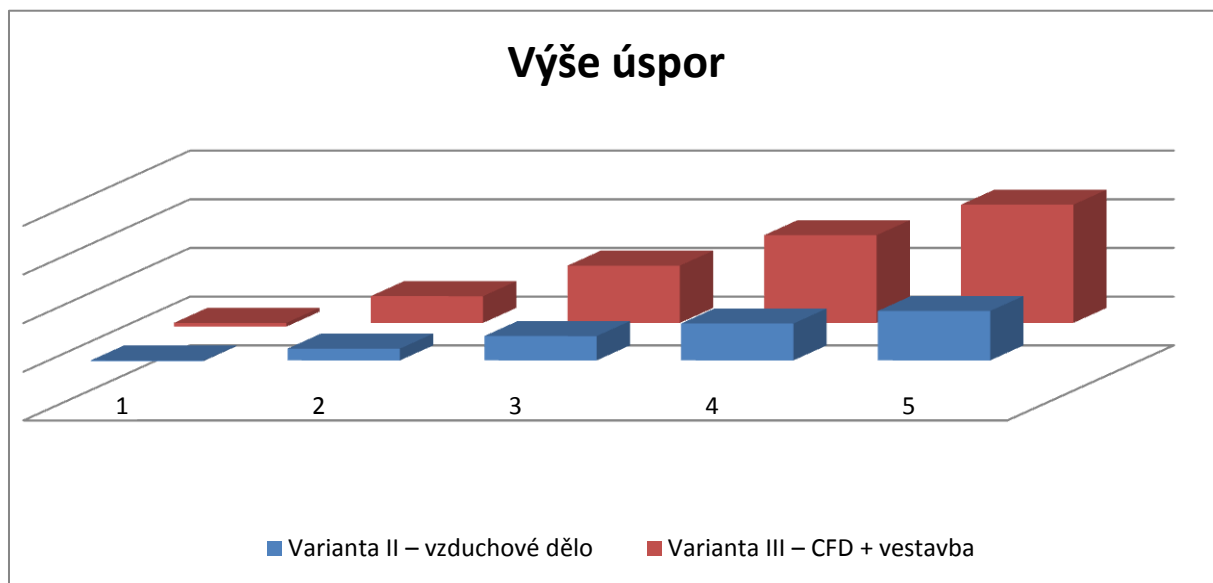


Obr. 14 - Grafické znázornění ročních nákladů pro jednotlivé varianty

Následující tabulka uvádí dosažené úspory pro obě varianty v relaci s původním stavem.

Úspory	1. rok	2. rok	3. rok	4. rok	5. rok
Varianta I – bez opatření	0	0	0	0	0
Varianta II – vzduchové dělo	-8 200 Kč	120 800 Kč	249 800 Kč	378 800 Kč	507 800 Kč
Varianta III – CFD + vestavba	-38 600 Kč	274 600 Kč	587 800 Kč	901 000 Kč	1 214 200 Kč

Tab. 10 - Dosažené úspory



Obr. 15 - Grafické znázornění výše úspor oproti původnímu řešení

6.3.5 Závěr

Z porovnání je patrné, že je ekonomicky nejvýhodnější Varianta III, i přes prvotní zvýšené investiční náklady, které ovšem nejsou nijak zvlášť významné. Roční náklady vyjádřené kumulovaně se u Varianty I v pátém roce provozu přibližně rovnají investici za nový modul trubkového registru.

6.4 ZAŘÍZENÍ PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ ODPADŮ MALÝCH KAPACIT

6.4.1 Úvod

Tato kapitola se zabývá ekonomickým zhodnocením projektu výstavby zařízení pro energetické využití odpadů malých kapacit (dále jen „ZEVO“). Konkrétně se jedná o technologickou jednotku s roční zpracovatelskou kapacitou 10 kt odpadů. Technologická koncepce včetně schématu je uvedena v kapitole 2.1. Vstupní údaje pro ekonomické zhodnocení vycházejí z předchozích technologických bilančních výpočtů zpracovaných v [4].

Pro ekonomické zhodnocení výše uvedeného projektu byl použit finanční model, ze kterého jako hlavní výsledek vyplývá vnitřní výnosové procento, volný peněžní tok a čistá skutečná hodnota projektu v daném okamžiku. Jedná se o základní důležité parametry ovlivňující rozhodování každého investora popř. banky v případě úvěrování projektu. Finanční model je uveden v Příloze č. 1.

6.4.2 Základní vstupní údaje

Finanční model je postaven na následujících základních předpokladech:

- 100% využití vlastních zdrojů financování pro realizaci projektu;
- životnost ZEVO se předpokládá na 25 let, přičemž samotný finanční model je zpracován po dobu 20-ti let od realizace projektu (dále jen „hodnocené období“);
- výše meziročního růstu cen uvažována jako konstantní rovnající se 3,5 % po celé hodnocené období; tato výše je stanovena konzervativně; zde se jedná o určité zjednodušení oproti možnosti využít makroekonomických predikcí vývoje meziročního růstu cen, které uveřejňuje Česká národní banka popř. Český statistický úřad;
- nepředpokládá se využití žádné investiční dotace pro realizace projektu, v současné době (rok 2012) se předpokládá vytvoření dotačního titulu pro projekty, jejichž náplní

bude výstavba ZEVO, přičemž se diskutuje o 20% investiční dotaci; implementace tohoto dotačního titulu spadá do gesce Ministerstva průmyslu a obchodu (MPO).

6.4.3 Investice a reinvestice

Celková výše investic zahrnutých do finančního modelu je součtem investic za kompletní technologickou jednotku a za stavební část. Technologická jednotka sestává z následujících hlavních zařízení: dávkování odpadu, spalovací komory s roštem, parního kotle, turbogenerátoru, zařízení pro dávkování aditiv, zařízení pro selektivní nekatalytickou redukci NO_x (SNCR), 4D filtru, spalínového ventilátoru, mokré pračky spalin a komínu, úpravnou napájecí vody, kondenzátoru, potrubí, spalínovodů a příslušenství. Součástí technologie jsou i prvky měření a regulace, systém řízení a část elektro. Celková výše investic za technologickou jednotku byla stanovena odborným odhadem. Předpokládá se s přívodem elektrické energie a vody na hranici dodávky, zároveň tak s napojením na kanalizaci.

Celková výše investic za kompletní technologickou jednotku je **70 mil. Kč bez DPH**.

Stavební část zahrnuje vybudování základů, betonového bunkru pro skladování odpadů, haly (opláštěná ocelové konstrukce) včetně protipožárního vybavení, příjezdové brány včetně detektoru radioaktivních materiálů a váhy. V rámci vybavení haly bude vybudován velín, šatny a sociální zařízení. Stavební část nezahrnuje vybudování oplocení, vnějšího osvětlení, příjezdových a obslužných komunikací.

Celková výše investic za stavební část je **20 mil. Kč bez DPH**.

Finanční model rovněž zahrnuje reinvestice do technologické jednotky v průběhu životního cyklu, kdy již není možné jednotlivé komponenty pouze opravit, ale je nutné je vyměnit za nové. Jedná se o tyto komponenty (v závorce je u každé položky uvedena doba, po které je třeba vždy reinvestici provést): vyzdívky spalovací komory (8), parní kotel (15), přehřívák a ekonomizér (8), těleso filtru (11), keramické elementy (4), mokrá pračka včetně venturi (11), spalínový ventilátor (11) a oběžné kolo turbíny (6).

Reinvestice do stavební části jsou zanedbány, předpokládá se totiž, že během hodnoceného období nebude nutné provádět žádné reinvestice, pouze údržbu.

V souvislosti s výše uvedenými investicemi počítá finanční model i s náklady na údržbu technologické a stavební části. Náklady na údržbu technologické a stavební části jsou během hodnoceného období vypočteny na základě procentuálního vyjádření z investic do

technologické, resp. stavební části. Rozdělení výše nákladů na údržbu během hodnoceného období je patrný z Přílohy č. 1 – Finanční model.

Investice do technologické a stavební části jsou do nákladů přenášeny ve formě odpisů. Finanční model počítá s rovnoměrným odpisováním.

Pro zjednodušení spadají veškeré investice technologické části do odpisové třídy 4 (tzn. 15 let odpisování). Ve skutečnosti by totiž měly být investice spojené s pořízením části elektro, měření a regulace a řízení zařazeny do jiné odpisové skupiny. Vzhledem k tomu ale, že se jedná jen asi o pouhou dvacetinu celkových investičních nákladů na technologickou část, nebude celkový výsledek finančního modelu tímto zásadně ovlivněn, a proto je toto zjednodušení pro daný projekt akceptovatelné.

Investice do stavební části spadají do odpisové třídy 5 (tzn. 30 let odpisování).

6.4.4 Náklady

Náklady jsou rozděleny do dvou hlavních kategorií: výkonová spotřeba a osobní náklady. Kategorie výkonové spotřeby zahrnuje veškeré provozní náklady spojené se spotřebou surovin a energií, s nakládáním škváry a popílku. Do této kategorie rovněž spadají náklady za služby, které zahrnují údržbu (předpokládá se outsourcing), pravidelné roční měření emisí autorizovanou měřicí skupinou a pravidelné povinné roční revize (kotel, komín, apod.)

V rámci kategorie osobních nákladů se pro běžný provoz a údržbu ZEVO předpokládá s nasazením 8 zaměstnanců, přičemž se počítá s průměrnou hrubou měsíční mzdou přepočtenou na náklady zaměstnavatele (tj. cca 35 000,- Kč/měsíc/zaměstnanec). Ve finančním modelu se předpokládá pravidelné meziroční navýšení mezd o 5 %.

6.4.5 Tržby

Celkové tržby jsou součtem dílčích tržeb za přijatý odpad a za prodanou elektrickou a tepelnou energii.

Cena za přijatý odpad k energetickému využití je stanovena na 1 300 Kč/t. Výhledově se předpokládá regulované zvýšení poplatku za skládkování, což by mělo umožnit i zvýšení ceny za přijatý odpad, teoreticky až na 2 000 Kč/t. Protože se ale v současné době jedná pouze o předpoklad, na který není možné 100% spoléhat, počítá finanční model se základní cenou 1 300 Kč/t, která je během hodnoceného období pouze každoročně zvyšována o inflaci.

Při prodeji vyrobené elektrické a tepelné energie se nepočítá s žádnou speciální finanční podporou ve formě např. zeleného bonusu nebo garantované zvýhodněné výkupní ceny. Dále

se předpokládá, že tepelná energie bude prodávána pouze během chladných období (konec podzimu, zima, začátek jara) tzn. v období cca 5 měsíců v roce.

6.4.6 Výkaz zisku a ztrát

Finanční model zahrnuje pouze zjednodušený výkaz zisku a ztrát, který ovšem plně vyhovuje účelům hodnocení. Hrubá marže je vypočtena jako rozdíl celkových tržeb a výkonové spotřeby. Dále odečtením celkových osobních nákladů a odpisů dostáváme provozní zisk. Z provozního zisku je vypočtena daň z příjmu, která je pro celé hodnocené období v konstantní výši rovnající se 20 %. Odečtením daně z příjmu získáváme čistý zisk.

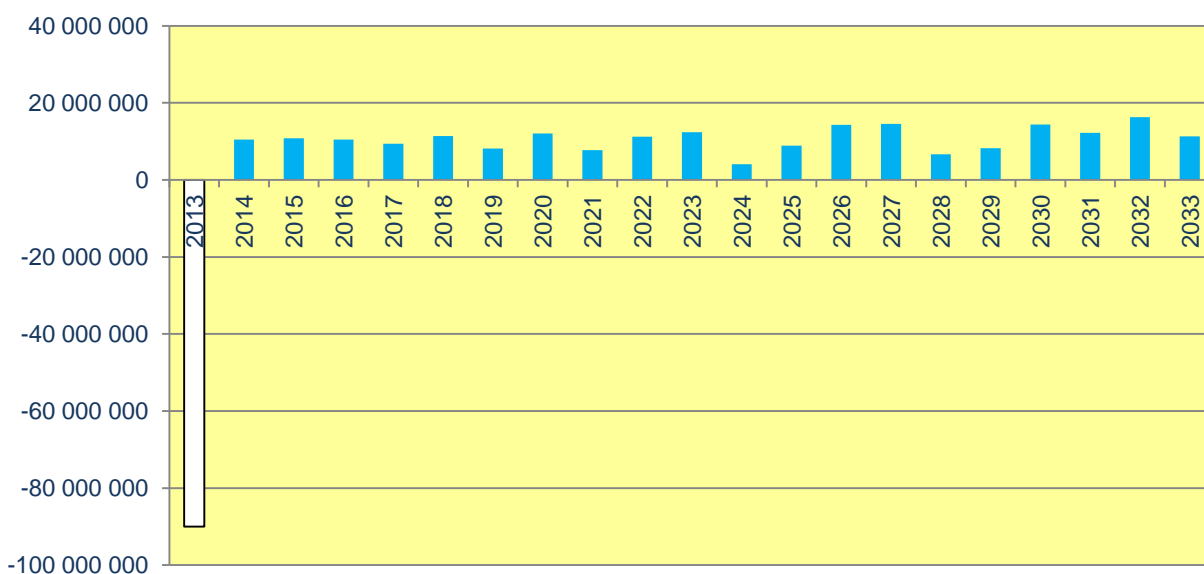
Výsledky výkazu zisku a ztrát slouží pro stanovení peněžních toků.

6.4.7 Peněžní toky

Peněžní toky jsou základním podkladem pro výpočet čisté současné hodnoty projektu a vnitřního výnosového procenta. Finanční model počítá pouze s provozním a investičním peněžním tokem. Provozní peněžní tok je součtem čistého zisku a odpisů. Investiční peněžní tok zahrnuje investice a reinvestice. Finanční peněžní tok není do finančního modelu zahrnut, neboť se předpokládá financování projektu z vlastních zdrojů bez využití úvěrování, které by se ve finančním peněžním toku jinak promítlo.

6.4.8 Vyhodnocení projektu

Pro vyhodnocení projektu je nejprve vypočten volný peněžní tok, který je součtem provozního zisku a odpisů upravený o odečet daně z příjmu a investičního peněžního toku.

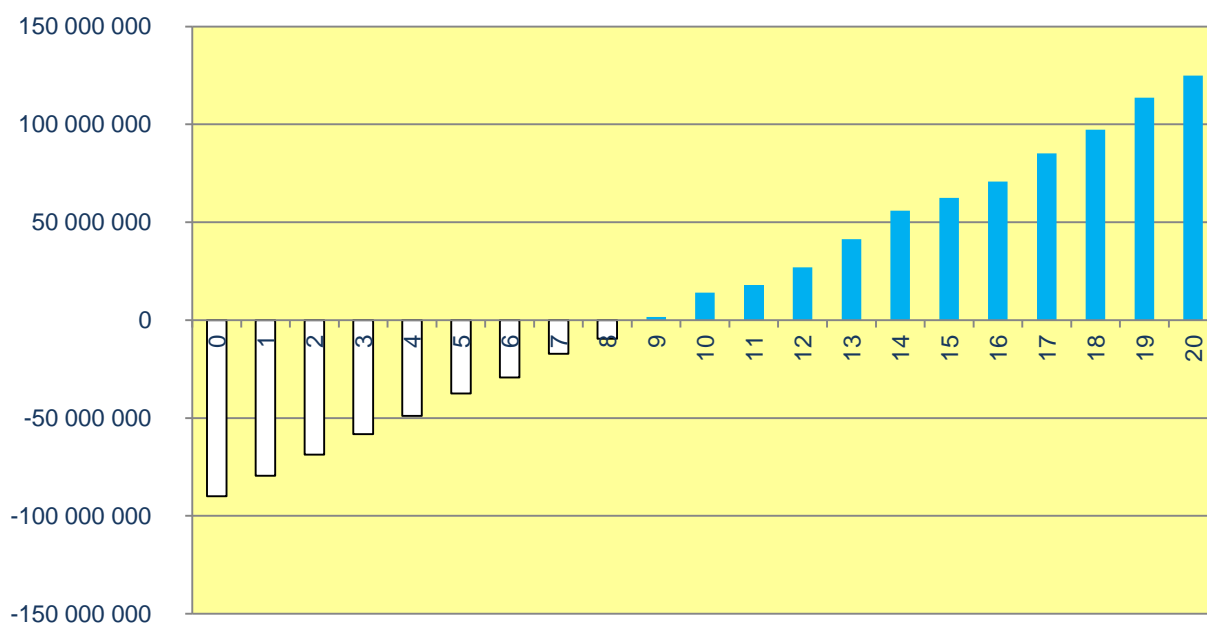


Obr. 16 - Volný peněžní tok

Z volného peněžního toku je vypočteno vnitřní výnosové procento projektu.

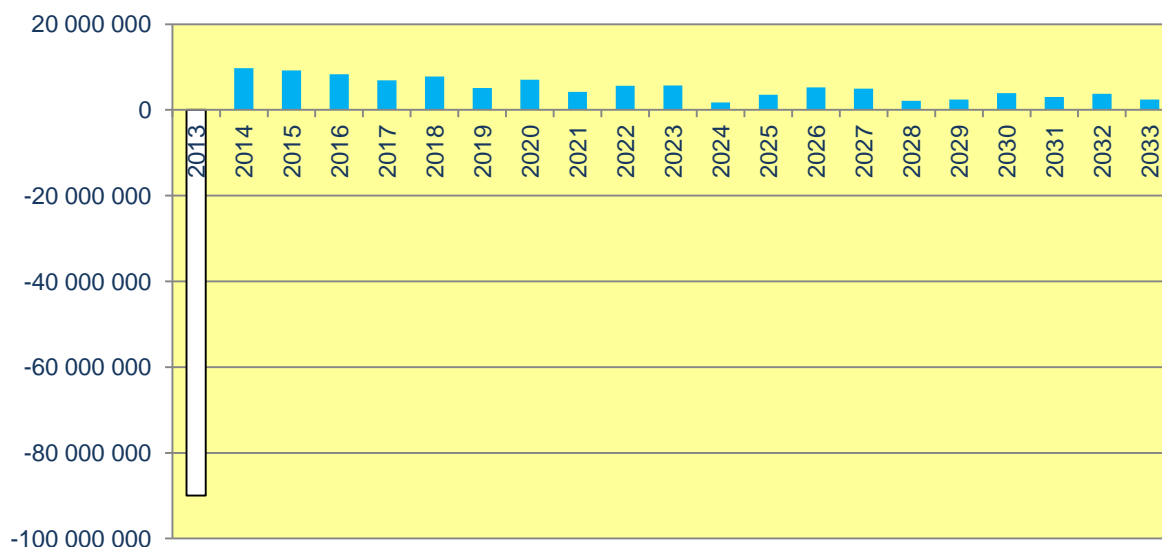
Vnitřní výnosové procento projektu: **9,80 %**

Tomu odpovídá prostá časová návratnost projektu na 9 let – viz graf Peněžní tok kumulovaně (CCF):



Obr. 17 - Peněžní tok kumulovaně

Pro výpočet čisté současné hodnoty projektu je nejprve vypočten diskontovaný volný peněžní tok.



Obr. 18 - Diskontovaný peněžní tok

Volný peněžní tok je pak diskontován touto sazbou pro celé hodnocené období. Čistá současná hodnota je pak vypočtena jako suma diskontovaného volného peněžního toku za celé hodnocené období.

Čistá současná hodnota projektu: **12,5 mil. Kč.**

6.4.9 Závěr

Z výsledků finančního modelu vyplývá, že je projekt pro investory zajímavý a to především díky vnitřnímu výnosovému procentu 9,80 %, které je v současné době vyšší než úroky na spořicíh účtech v bankách. Projekt se stane ekonomicky ještě mnohem zajímavějším, v případě implementace investičních dotací na výstavbu ZEVO a případných bonusů za prodej elektrické energie.

6.5 TECHNOLOGICKÁ JEDNOTKA PRO ENERGETICKÉ VYUŽITÍ DŘEVNÍHO ODPADU

6.5.1 Úvod

Tato kapitola se zabývá finanční analýzou projektu výstavby technologické jednotky pro energetické využití dřevního odpadu. Technologická jednotka je primárně určena pro spalování dřevního odpadu (dřevní štěpka, odřezky, piliny, kůra), ovšem umožňuje spalování

i jiných druhů biomasy (sláma, amarant, řepkové pokruty, slunečnicové šroty, kukuřičné zbytky, apod.) Technologická jednotka zahrnuje skladování a dopravu paliva, spalovací komoru, parní kotel, náporovou turbínu s generátorem, multicyklón, spalínový ventilátor, ekonomizér, komín a příslušenství. Jmenovitý parní výkon kotle je 4,5 t/h, 13 bar(g), 220 °C. Vyrobená pára je přivedena na náporovou turbínu, která prostřednictvím generátoru vyrábí elektrickou energii. Svorkový elektrický výkon je 200 kW_{el}. Pára za turbínou poté vstupuje do kondenzátoru, kde kondenzuje a předává svou energii pro výrobu teplé vody. Tepelný výkon v teplé vodě je 2 400 kW a je využíván pro sušárny dřeva. Okruh teplé vody je navržen na teplotní spád 90/70 °C. Na teplovodní větvi je instalován vzduchový kondenzátor – mařič, který je provozován v případě, kdy není možné celý tepelný výkon spotřebovat v sušárnách. Je navržen tak, aby byl schopen pokrýt celkový tepelný výkon, funguje tedy i jako bezpečnostní člen. Mezi příslušenství technologické jednotky patří chemická a termická úprava napájecí vody. Tyto položky jsou zahrnuty do technologické části.

Technologická jednotka je instalována na betonovou základovou desku, je umístěna v hale, kterou tvoří opláštěná ocelová konstrukce, součástí je i velín. Tyto položky jsou zahrnuty do stavební části.

Pro ekonomické zhodnocení výše uvedeného projektu byl použit finanční model, ze kterého jako hlavní výsledek vyplývá vnitřní výnosové procento, volný peněžní tok a čistá skutečná hodnota projektu v daném okamžiku. Jedná se o základní důležité parametry ovlivňující rozhodování každého investora popř. banky v případě úvěrování projektu. Finanční model je uveden v Příloze č.2.

6.5.2 Základní vstupní údaje

- 100% využití vlastních zdrojů financování pro realizaci projektu;
- životnost technologické jednotky se předpokládá na 25 let, přičemž samotný finanční model je zpracován po dobu 20-ti let od realizace projektu (dále jen „hodnocené období“);
- výše meziročního růstu cen uvažována jako konstantní rovnající se 3,5 % po celé hodnocené období; tato výše je stanovena konzervativně; zde se jedná o určité zjednodušení oproti možnosti využít makroekonomických predikcí vývoje meziročního růstu cen, které uveřejňuje Česká národní banka popř. Český statistický úřad;
- nepředpokládá se využití žádné investiční dotace pro realizaci projektu, v současné době (rok 2012) je ovšem možné získat finanční podporu ve formě investiční dotace

na výstavbu takové jednotky prostřednictvím operačních programů Evropské Unie, orientačně se jedná o 30 – 40 % uznatelných nákladů.

- předpokládá se s využitím zeleného bonusu při prodeji elektrické energie do sítě,
- předpokládá se s prodejem tepelné energie pro provoz sušáren 10 měsíců ročně.

6.5.3 Investice a reinvestice

Celková výše investic zahrnutých do finančního modelu je součtem investic za kompletní technologickou jednotku a za stavební část. Celková výše investic za technologickou jednotku byla stanovena odborným odhadem. Předpokládá se s přívodem elektrické energie a vody na hranici dodávky, zároveň tak s napojením na kanalizaci.

Celková výše investic za kompletní technologickou jednotku je **22 mil. Kč bez DPH.**

Stavební část zahrnuje vybudování základů, haly (opláštěná ocelové konstrukce) včetně protipožárního vybavení. Stavební část nezahrnuje vybudování oplocení, vnějšího osvětlení, příjezdových a obslužných komunikací.

Celková výše investic za stavební část je **5 mil. Kč bez DPH.**

Finanční model rovněž zahrnuje reinvestice do technologické jednotky v průběhu životního cyklu, kdy již není možné jednotlivé komponenty pouze opravit, ale je nutné je vyměnit za nové. Jedná se o tyto komponenty (v závorce je u každé položky uvedena doba, po které je třeba vždy reinvestici provést): vyzdívky (8), parní kotel (15), přehřívák (8), spalínový ventilátor (11) a oběžné kolo turbíny (6).

Reinvestice do stavební části jsou zanedbány, předpokládá se totiž, že během hodnoceného období nebude nutné provádět žádné reinvestice, pouze údržbu.

V souvislosti s výše uvedenými investicemi počítá finanční model i s náklady na údržbu technologické a stavební části. Náklady na údržbu technologické a stavební části jsou během hodnoceného období vypočteny na základě procentuálního vyjádření z investic do technologické, resp. stavební části. Rozdělení výše nákladů na údržbu během hodnoceného období je patrný z Přílohy č. 2 – Finanční model.

Investice do technologické a stavební části jsou do nákladů přenášeny ve formě odpisů. Finanční model počítá s rovnoměrným odpisováním.

Pro zjednodušení spadají veškeré investice technologické části do odpisové třídy 4 (tzn. 15 let odpisování). Ve skutečnosti by totiž měly být investice spojené s pořízením části elektro, měření a regulace a řízení zařazeny do jiné odpisové skupiny. Vzhledem k tomu ale, že se jedná jen asi o pouhou desetinu celkových investičních nákladů na technologickou část, nebude celkový výsledek finančního modelu tímto zásadně ovlivněn, a proto je toto zjednodušení pro daný projekt akceptovatelné.

Investice do stavební části spadají do odpisové třídy 5 (tzn. 30 let odpisování).

6.5.4 Náklady

Náklady jsou rozděleny do dvou hlavních kategorií: výkonová spotřeba a osobní náklady. Kategorie výkonové spotřeby zahrnuje veškeré provozní náklady spojené se spotřebou surovin a energií, s nakládáním s popelem. Do této kategorie rovněž spadají náklady za služby, které zahrnují údržbu (předpokládá se outsourcing), pravidelné roční měření emisí autorizovanou měřicí skupinou a pravidelné povinné roční revize (kotel, komín, apod.)

V rámci kategorie osobních nákladů se pro běžný provoz a údržbu technologické jednotky předpokládá s nasazením 1 zaměstnance, přičemž se počítá s průměrnou hrubou měsíční mzdou přepočtenou na náklady zaměstnavatele (tj. cca 35 000,- Kč/měsíc/zaměstnanec). Ve finančním modelu se předpokládá pravidelné meziroční navýšení mezd o 5 %.

6.5.5 Tržby

Celkové tržby jsou součtem dílčích tržeb za prodanou elektrickou a tepelnou energii.

Při prodeji vyrobené elektrické energie se počítá se zeleným bonusem. V případě tepelné energie se nepočítá s žádnou speciální finanční podporou ve formě např. zeleného bonusu nebo garantované zvýhodněné výkupní ceny.

6.5.6 Výkaz zisku a ztrát

Finanční model zahrnuje pouze zjednodušený výkaz zisku a ztrát, který ovšem plně vyhovuje účelům hodnocení. Hrubá marže je vypočtena jako rozdíl celkových tržeb a výkonové spotřeby. Dále odečtením celkových osobních nákladů a odpisů dostáváme provozní zisk. Z provozního zisku je vypočtena daň z příjmu, která je pro celé hodnocené období v konstantní výši rovnající se 20 %. Odečtením daně z příjmu získáváme čistý zisk.

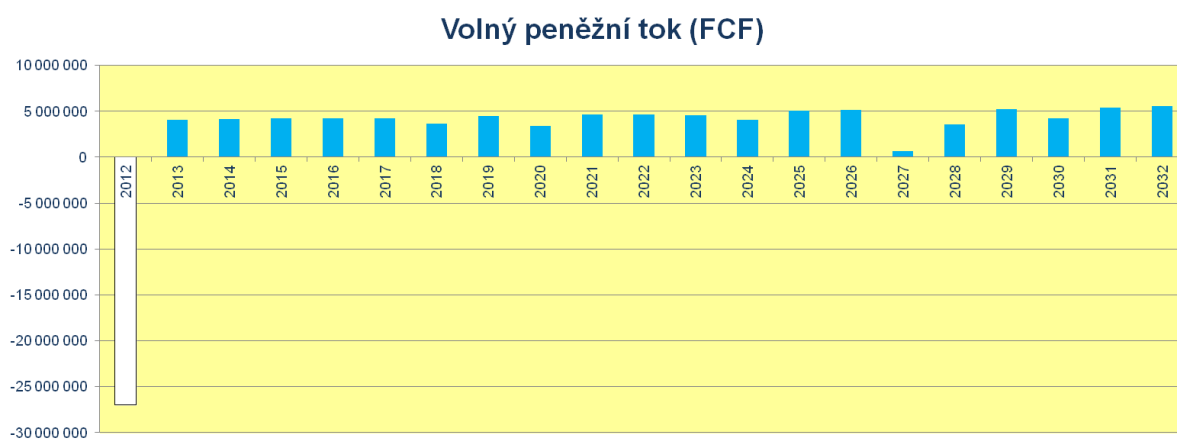
Výsledky výkazu zisku a ztrát slouží pro stanovení peněžních toků.

6.5.7 Peněžní toky

Peněžní toky jsou základním podkladem pro výpočet čisté současné hodnoty projektu a vnitřního výnosového procenta. Finanční model počítá pouze s provozním a investičním peněžním tokem. Provozní peněžní tok je součtem čistého zisku a odpisů. Investiční peněžní tok zahrnuje investice a reinvestice. Finanční peněžní tok není do finančního modelu zahrnut, neboť se předpokládá financování projektu z vlastních zdrojů bez využití úvěrování, které by se ve finančním peněžním toku jinak promítlo.

6.5.8 Vyhodnocení projektu

Pro vyhodnocení projektu je nejprve vypočten volný peněžní tok, který je součtem provozního zisku a odpisů upravený o odečet daně z příjmu a investičního peněžního toku.

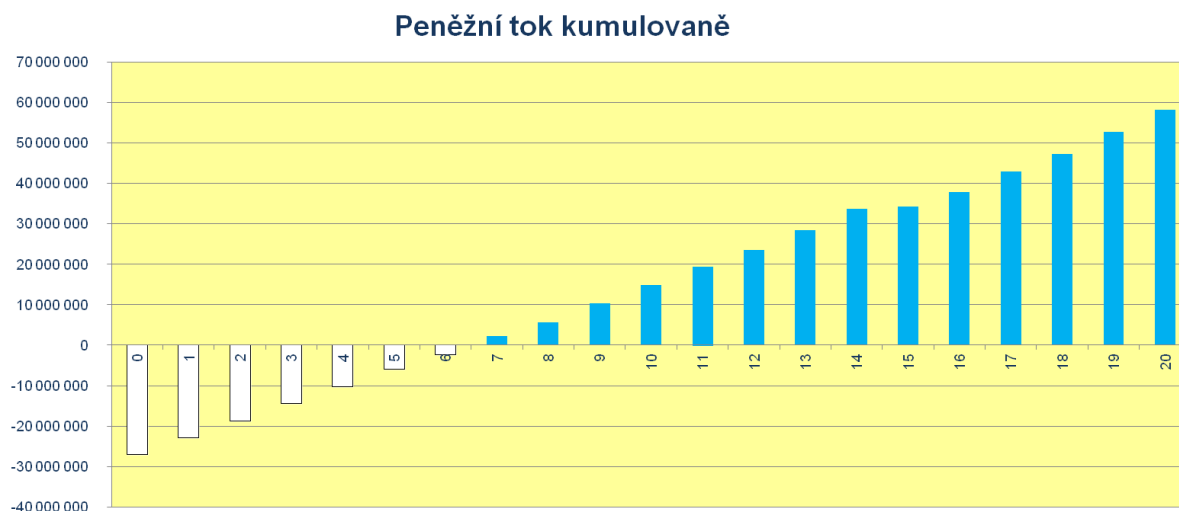


Obr. 19 - Volný peněžní tok

Z volného peněžního toku je vypočteno vnitřní výnosové procento projektu.

Vnitřní výnosové procento projektu: **14,47 %**

Tomu odpovídá prostá časová návratnost projektu na 7 let – viz graf Peněžní tok kumulovaně:



Obr. 20 - Peněžní tok kumulovaně

Pro výpočet čisté současné hodnoty projektu je nejprve vypočten diskontovaný volný peněžní tok.



Obr. 21 - Diskontovaný peněžní tok

Volný peněžní tok je pak diskontován touto sazbou pro celé hodnocené období. Čistá současná hodnota je pak vypočtena jako suma diskontovaného volného peněžního toku za celé hodnocené období.

Čistá současná hodnota projektu: **14,3 mil. Kč.**

6.5.9 Závěr

Z výsledků finančního modelu vyplývá, že lze projekt investorům doporučit k realizaci díky vysoké hodnotě vnitřního výnosového procenta. Projekt se stane ekonomicky ještě mnohem zajímavějším s využitím investičních dotací.

7 ZÁVĚR

Práce si kladla za cíl přiblížit možnosti nasazení různých úrovní modelování s ohledem na inženýrskou praxi. Důraz byl kladen i na využití pokročilých výpočtových metod (CFD).

V inženýrské praxi je vždy třeba důkladně zvážit, jakou úroveň modelování je třeba zvolit s ohledem na mnoho faktorů, jako jsou časové možnosti, komplexnost úlohy, stupeň využití, pravděpodobnost realizace projektu. Tyto všechny faktory spojuje faktor ekonomický – jaké prostředky je vhodné a možné vynaložit na modelování.

U modelování využívající CFD se ukazuje, že nejdůležitější roli zde hrají právě ekonomické faktory. Vysoké investiční nároky spojené s pořízením software a výkonného hardware dohromady s časovou náročností na provedení simulačních výpočtů představují hlavní „proti“. K těm je třeba ještě připočíst nedostatečnou spolehlivost výsledků v případě řešení složitějších fyzikálně-chemických jevů např. spalování. Na druhou stranu, v případě nasazení modelování na bázi CFD v rámci optimálně sestaveného týmu zkušených odborníků (projektant – provozovatel – výpočtář) může tento přístup představovat přidanou hodnotu, kterou je možné komerčně zužitkovat, a to jak ve fázi návrhu nových moderních zařízení tak i při řešení problémů stávajících zařízení s ohledem na optimalizaci jejich provozních a konstrukčních parametrů.

V rámci případových studií jsou představeny finanční modely pro ekonomické zhodnocení konkrétních projektů. Dílčí závěry jsou shrnuty v závěru každé příslušné kapitoly. Obecně však lze říci, že teprve až ekonomické zhodnocení dokáže přesvědčit zákazníka pro realizaci daného projektu.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Anderson, J.D. Jr., Computational Fluid Dynamics; The Basics with Applications, McGraw-Hill, Inc., New York, 1995
- [2] Směrnice Evropského parlamentu a Rady 2000/76/ES ze dne 4. prosince 2000 o spalování odpadů (2000) Úřední věstník Evropské unie L 332
- [3] P. Petr, Analýza proudění v sekundární spalovací komoře, Diplomová práce, VUT v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství, Brno, 2005
- [4] Ucekaj, V. Analýza možností nakládání s komunálními odpady v rámci mikroregionu. Brno, 2010. 153 s. Disertační práce na Vysokém učení technickém v Brně na Fakultě strojního inženýrství na Ústavu procesního a ekologického inženýrství. Vedoucí disertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [5] Nekvasil R., Pavlas M., Stromský O., Stehlík P. Analýza geometrie výměníku tepla pro předehřev vzduchu, VZ-MPO-2008/01, VUT Brno, září 2008
- [6] Hájek, J.; Kermes, V.; Bébar, L.; Stehlík, P. CFD Modelling and Design Optimisation of an Exhaust Duct. In 15th International Congress of Chemical and Process Engineering CHISA 2002, 5th Conference on Process Integration, Modelling and Optimisation for Energy Saving and Pollution Reduction PRES 2002. Prague, Czech Republic: 2002. s. 152- 165 (s.)ISBN: 80-86059-33- 2.
- [7] Hájek J., Pavlas M., Urban L., Stehlík P., Matematické modelování jako podpůrný nástroj při návrhu prototypu experimentální jednotky pro energetické využití různých druhů biomasy a fytomasy, Výzkumná zpráva VZ-MPO-2006/02, VUT Brno, listopad 2006
- [8] Fluent Inc., FLUENT 6.1 User's Guide, Fluent Inc., Lebanon, 2003
- [9] Fluent Inc., GAMBIT User's Guide, Fluent Inc., Lebanon, 2002
- [10] Menter F.R. 'Two equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications', *AIAA Journal*, **32**, pp. 1598-1605, 1994

- [11] Agrawal L., Mandal J.C., and Marathe A.G. ‘Computations of laminar and turbulent mixed convection in a driven cavity using pseudo-compressibility approach’, *Computers and Fluids*, **30**, pp. 607-620, 2001
- [12] Veynante, D., Vervisch, L., Turbulent combustion modeling, *Progress in Energy and Combustion Science* 28, pp. 193 – 266, 2002
- [13] Magnussen, B.F., Hjertager B.H. On mathematical models of turbulent combustion with special emphasis on soot formation and combustion, *16th Symposium (International) on Combustion*, The Combustion Institute, 1985
- [14] Murthy, J.Y. and Mathur, S.R. ‘A Finite Volume Method For Radiative Heat Transfer Using Unstructured Meshes’, AIAA-98-0860, 1998
- [15] Hill, S.C., Smoot, L.D., ‘Modeling of nitrogen oxides formation and destruction in combustion systems’, *Progress in Energy and Combustion Science*, **26**, pp. 417-458, 2000
- [16] A. Frassoldati, S. Frigerio, E. Colombo, F. Inzoli, T. Faravelli, Determination of NOx emissions from strong swirling confined flames with an integrated CFD-based procedure, *Chemical Engineering Science* 60 (2005) 2851 – 2869, 2004
- [17] European Integrated Pollution Prevention and Control Bureau (2010) Reference document on best available techniques for the Waste Incineration (2006), cit. [2010-5-20]
- [18] Filip M. (2009) Aplikace účinných aparátů pro čištění spalin v reálných technologických linkách, disertační práce, Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav procesního a ekologického inženýrství (2009), 138 str., vedoucí disertační práce doc. Ing. Ladislav Bébar, CSc.
- [19] Kolarčík K. (2009) Parní a plynové turbíny v redukčních stanicích, Česká energetická agentura, cit. [2010-8-6], dostupné z www.mpo-efekt.cz/dokument/98_893.pdf
- [20] Clear Edge (2010) Cerafil TopKat [online], cit. [2010-7-20], dostupné z www.clear-edge.com/cerafil_topkat/

SEZNAM PŘÍLOH

- | | |
|--------------|--|
| Příloha č. 1 | Finanční model pro zařízení pro energetické využití odpadů malých kapacit |
| Příloha č. 2 | Finanční model pro technologickou jednotku pro energetické využití dřevního odpadu |
| Příloha č. 3 | Použité výpočtové vztahy |

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

CFD	Computational Fluid Dynamics (Výpočetní dynamika tekutin)
4D	u technologie katalytické filtrace odpovídá čtyřem jednotkovým operacím: deDusting (odprašování), DeSOx (redukce emisí oxidů síry), DeNOx (denitrifikace) a DeDiox (destrukce dioxinů a furanů)
NOx	oxidy dusíku (oxid dusnatý, oxid dusičitý)
VOC	Volatile Organic Compounds (těkavé organické látky)
ÚPEI	Ústav procesního a ekologického inženýrství (na VUT v Brně, Fakultě strojního inženýrství)
c_p	měrná tepelná kapacita
T_{in}	vstupní teplota
T_{out}	výstupní teplota
ZEVO	zařízení pro energetické využití odpadů
SNCR	Selective Non-Catalytic Reduction (selektivní nekatalytická redukce)
CF	Cash Flow (peněžní tok)
FCF	Free Cash Flow (volný peněžní tok)
DCF	Discounted Cash Flow (diskontovaný peněžní tok)

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - Schéma technologie pro energetické využití odpadů (zdroj [4]).....	10
Obr. 2 - Integrovaná jednotka pro termické zpracování VOC	22
Obr. 3 – Výpočetní síť a vizualizace výsledků	22
Obr. 4 - Jednotka pro energetické využití různých druhů biomasy.....	23
Obr. 5 – Využití CFD při návrhu nové jednotky na spalování různých druhů biomasy.....	25
Obr. 6 - Zkušební hořák	27
Obr. 7 - Geometrie hořáku a spalovací komory	29
Obr. 8 - Výpočtová síť	29
Obr. 9 - Alternativy uspořádání palivových trysek	30
Obr. 10 – Experimentální zařízení – zkušebna hořáků	35
Obr. 11 - Schéma okruhu vodního chlazení zkušební spalovací komory	36
Obr. 12 - Porovnání naměřených a vypočtených údajů	40
Obr. 13 - Zjednodušené technologické schéma systému utilizace tepla spalin	42
Obr. 14 - Grafické znázornění ročních nákladů pro jednotlivé varianty.....	46
Obr. 15 - Grafické znázornění výše úspor oproti původnímu řešení	46
Obr. 16 - Volný peněžní tok.....	50
Obr. 17 - Peněžní tok kumulovaně.....	51
Obr. 18 - Diskontovaný peněžní tok	52
Obr. 19 - Volný peněžní tok.....	56
Obr. 20 - Peněžní tok kumulovaně.....	57
Obr. 21 - Diskontovaný peněžní tok	57

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Výsledky výpočtu - natočení trysek 0°	32
Tab. 2 - Výsledky výpočtu - natočení trysek 45°	32
Tab. 3- Výsledky výpočtu - natočení trysek 90°	33
Tab. 4 - Provozní parametry při provádění měření	37
Tab. 5 - Chladicí voda - Naměřené hodnoty a bilanční údaje	38
Tab. 6 - Vypočtené tepelné toky alternativy A a B	39
Tab. 8 - Náklady na odstávku.....	44
Tab. 9 - Investiční a provozní náklady v prvním roce	45
Tab. 10 - Roční náklady kumulovaně	45
Tab. 11 - Dosažené úspory	46